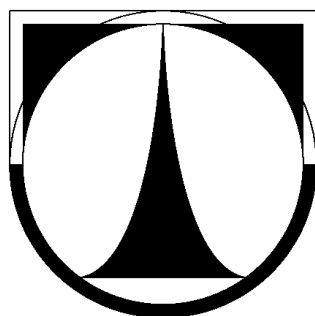


Technická univerzita v Liberci  
Fakulta strojní



Jan Tauchman

# **KONSTRUKCE PROTOTYPU CNC STROJE PRO LASEROVÉ ŘEZÁNÍ PLECHŮ**

Diplomová práce

2012

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů

Obor : Výrobní systémy

Zaměření : Pružné výrobní systémy pro strojírenskou výrobu

## **KONSTRUKCE PROTOTYPU CNC STROJE PRO LASEROVÉ ŘEZÁNÍ PLECHŮ**

## **DESIGN OF CNC PROTOTYPE MACHINE FOR METAL SHEETS LASER CUTTING**

KVS - VS - 223

Jan Tauchman

Vedoucí práce :

Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Počet stran : 56

Počet příloh : 7

Počet obrázků : 28

Počet tabulek : 4

Počet modelů

nebo jiných příloh : 0

V Liberci 24.5.2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení      **Jan T a u c h m a n**

studijní program      **N2301 Strojní inženýrství**

obor      **2301T030 Výrobní systémy**

zaměření      **pružné výrobní systémy pro strojírenskou výrobu**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

### **Konstrukce prototypu CNC stroje pro laserové řezání plechů**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uved'te hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

Hlavním cílem této práce je navrhnout konstrukci prototypu CNC stroje pro laserové řezání plechů o pracovním rozsahu 1200x1500x500mm, rychlost koncového prvku 10m/min, přesnost polohování 0,01mm. Návrh má vycházet ze zkušeností z konstrukce podobného prototypu na katedře výrobních systémů.

Doporučené metody pro vypracování:

1. Provést studii podobných komerčních strojů (laserové řezací stroje, modelovací frézky).
2. Seznámit se se současným vybavením a zařízeními, která budou na prototypu CNC stroje umístěná či k němu připojená. Jedná se o řídicí systém a pohony firmy Siemens. Vláknový řezací laser 400W – JK400FL od firmy GSI.
3. Na základě definovaných parametrů provést návrh a propočty vhodných pohybových os a celé konstrukce prototypu CNC stroje.
4. Vyřešit připojení pohonů, řídicího systému a laserové hlavy.
5. Pokud bude možné, tak provést realizaci a otestování funkčnosti stroje.



Forma zpracování diplomové práce:

Rozsah průvodní zprávy cca 60 stran textu včetně příloh.

Diplomová práce včetně příloh bude v elektronické formě přiložena na CD (či DVD) k tištěnému svazku diplomové práce.


Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

1. MAREK, J.: *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Speciální vydání MM Průmyslové spektrum, září 2006, ISSN 1212-2572
2. BRENÍK, P. – PÍČ, J.: *Obráběcí stroje, konstrukce a výpočty*. SNTL Praha 1986
3. KÖNIG, V.: *Obráběcí stroje*, skripta, VŠST Liberec 1989, ISBN 80-7083-023-9
4. ZELENÝ, P.: *Návrh a konstrukce prototypu víceúčelového CNC stroje*, Disertační práce, TUL 2006
5. Firemní katalogy a podklady.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: prof. Ing. Přemysl Pokorný, CSc.



  
Ing. Petr Zelený, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.  
děkan

V Liberci dne 1. března 2012

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedeném lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

**TÉMA : KONSTRUKCE PROTOTYPU CNC STROJE PRO LASEROVÉ  
ŘEZÁNÍ PLECHŮ**

**ANOTACE :** Diplomová práce se zabývá návrhem prototypu CNC stroje, který bude na Katedře výrobních systémů sloužit k řezání plechů laserem. Je zde popsána konstrukce rámu stroje z hliníkových profilů a připojení polohovacího systému a laserové hlavy. Práce se zabývá i výpočtem použitých pohonů. Také jsou uvedeny příklady podobných komerčně vyráběných strojů.

**THEME : DESIGN OF CNC PROTOTYPE MACHINE FOR METAL SHEETS  
LASER CUTTING**

**ANNOTATION:** This diploma thesis deals with design of CNC prototype machine, which will be used for metal sheets laser cutting at the Department of manufacturing systems. Construction of machine frame made of aluminum profiles, and connection of motion system and laser head is described here. The thesis also deals with calculation of applied drives. The examples of commercially produced machines similar to the designed one are also listed here.

Desetinné třídění :

**Klíčová slova :** CNC, Laser, Konstrukce strojů, Hliníkové profily, Kuličkový šroub, Pohon

**Keywords:** CNC, Laser, Design of machines, Aluminum profiles, Ball-screw, Drive

**Zpracovatel :** TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů

**Dokončeno :** 2012

**Archivní označení zprávy :**

Počet stran : 56

Počet příloh : 7

Počet obrázků : 28

Počet tabulek : 4

Počet modelů

nebo jiných příloh : 0

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Rád bych na tomto místě poděkoval panu Ing. Petru Zelenému Ph.D., za zajímavé téma diplomové práce a její vedení. Dále bych chtěl poděkovat panu Prof. Ing. Přemyslu Pokornému, CSc. za odborné konzultace a připomínky ohledně konstrukce celého stroje. Také bych rád poděkoval panu Ing. Miroslavu Novákovi, CSc. za cenné rady, týkající se navrhování ráků ze stavebnicových systémů z hliníkových profilů. Nakonec chci poděkovat svým rodičům, kteří mě podporovali po celou dobu studia.

*Výzkum prezentovaný v této práci byl částečně podpořen projektem OP VaVpI Centrum pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace CZ.1.05/2.1.00/01.0005.*

*Realizace této práce byla podpořena projektem studentské grantové soutěže TUL Komplexní optimalizace výrobních systémů a procesů (interní číslo projektu 2821) v rámci specifického vysokoškolského výzkumu.*



# Obsah

<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>2. CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>13</b>
<b>3. LASER, LASEROVÉ ŘEZÁNÍ .....</b>	<b>14</b>
<b>4. PŘÍKLADY PODOBNÝCH STROJŮ .....</b>	<b>15</b>
4.1 MODELOVACÍ FRÉZKY .....	15
4.1.1 CAM 1520 Premium .....	15
4.1.2 FlatCom M50.....	16
4.1.3 GPY 138/158.....	16
4.1.4 Porovnání modelovacích frézek.....	17
4.2 LASEROVÉ ŘEZACÍ STROJE .....	17
4.2.1 TruLaser 1030 .....	17
4.2.2 PROFILE PLUS 3015 .....	18
4.2.3 M-1600.....	19
4.2.4 Salvagnini L3-30.....	19
4.2.5 Porovnání laserových řezacích strojů .....	20
<b>5. DOSTUPNÉ SOUČÁSTI.....</b>	<b>21</b>
5.1 LASEROVÉ ZAŘÍZENÍ .....	21
5.2 SERVOMOTORY .....	23
5.3 ŘÍDICÍ SYSTÉM .....	23
5.4 LINEÁRNÍ JEDNOTKY .....	24
<b>6. KONSTRUKCE RÁMU STROJE .....</b>	<b>26</b>
6.1 RÁMY STROJŮ .....	26
6.2 PROFILOVÝ SYSTÉM MAYTEC .....	27
6.3 NÁVRH RÁMU.....	29
6.4 VÝPOČET HMOTNOSTI RÁMU .....	31
<b>7. PŘIPOJENÍ POLOHOVACÍHO SYSTÉMU .....</b>	<b>32</b>
7.1 PŘIPOJENÍ LINEÁRNÍCH JEDNOTEK OSY Y K RÁMU .....	32
7.2 PŘIPOJENÍ LINEÁRNÍ JEDNOTKY OSY X .....	33

7.3 PŘIPOJENÍ LINEÁRNÍ JEDNOTKY OSY Z .....	34
7.4 HRÍDELOVÁ SPOJKA .....	35
7.5 PŘÍRUBA.....	36
7.6 STROJ S PŘIPOJENÝM POLOHOVACÍM SYSTÉMEM.....	37
7.7 VÝPOČET HMOTNOSTI POLOHOVACÍHO SYSTÉMU A CELÉHO STROJE .....	38
<b>8. PŘIPOJENÍ LASEROVÉ JEDNOTKY .....</b>	<b>40</b>
8.1 UPEVNĚNÍ LASEROVÉ HLAVY .....	40
8.2 VEDENÍ OPTICKÉHO KABELU .....	41
<b>9. VÝPOČET POHONŮ.....</b>	<b>43</b>
9.1 ZÁSADY PRO NÁVRH POLOHOVÝCH SERVOPOHONŮ .....	43
9.2 VÝPOČET POHONU OSY X.....	43
9.2.1 <i>Kontrola maximálních otáček.....</i>	<i>43</i>
9.2.2 <i>Kontrola posuvové rychlosti.....</i>	<i>44</i>
9.2.3 <i>Výpočet tuhosti kuličkového šroubu .....</i>	<i>45</i>
9.2.4 <i>Kontrola přiměřeného momentu setrvačnosti .....</i>	<i>46</i>
9.2.5 <i>Celkový třecí moment šroubu a jeho uložení.....</i>	<i>46</i>
9.2.6 <i>Kontrola momentu a výkonu motoru .....</i>	<i>47</i>
9.2.7 <i>Kontrola přesnosti polohování .....</i>	<i>47</i>
9.3 VÝPOČET POHONU OSY Y .....	48
9.3.1 <i>Kontrola maximálních otáček.....</i>	<i>48</i>
9.3.2 <i>Kontrola posuvové rychlosti.....</i>	<i>48</i>
9.3.3 <i>Výpočet tuhosti kuličkového šroubu .....</i>	<i>48</i>
9.3.4 <i>Kontrola přiměřeného momentu setrvačnosti: .....</i>	<i>49</i>
9.3.5 <i>Celkový třecí moment šroubu a jeho uložení.....</i>	<i>49</i>
9.4.6 <i>Kontrola momentu a výkonu motoru .....</i>	<i>49</i>
9.4 VÝPOČET POHONU OSY Z .....	50
9.4.1 <i>Kontrola maximálních otáček.....</i>	<i>50</i>
9.4.2 <i>Kontrola posuvové rychlosti.....</i>	<i>50</i>
9.4.3 <i>Výpočet tuhosti kuličkového šroubu .....</i>	<i>50</i>
9.4.4 <i>Kontrola přiměřeného momentu setrvačnosti: .....</i>	<i>51</i>
9.4.5 <i>Celkový třecí moment šroubu a jeho uložení.....</i>	<i>51</i>
9.4.6 <i>Kontrola momentu a výkonu motoru .....</i>	<i>51</i>

<b>10. REALIZACE STROJE.....</b>	<b>52</b>
<b>11. ZÁVĚR.....</b>	<b>53</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>54</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>56</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$a$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	Zrychlení posuvu os
$A$	$[\text{m}^2]$	Průřez kuličkového šroubu
$c_K$	$[\text{m}\cdot\text{N}^{-1}]$	Poddajnost šroubu v krutu
$c_T$	$[\text{m}\cdot\text{N}^{-1}]$	Poddajnost šroubu v tahu
$C_a$	$[\text{N}]$	Dynamická únosnost kuličkové matice
$d$	$[\text{m}]$	Jmenovitý průměr kuličkového šroubu
$E$	$[\text{Pa}]$	Modul pružnosti v tahu
$f$	$[-]$	Součinitel tření
$f_0$	$[\text{Hz}]$	Vlastní frekvence
$F_{Pm}$	$[\text{N}]$	Síla od předeprnutí matice
$g$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	Gravitační zrychlení
$G$	$[\text{Pa}]$	Modul pružnosti ve smyku
$i$	$[-]$	Počet činných závitů matice
$J_m$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	Moment setrvačnosti motoru
$J_{red}$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	Redukovaný moment setrvačnosti
$J_S$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	Moment setrvačnosti kuličkového šroubu
$k$	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$	Celková tuhost kuličkového šroubu
$k_d$	$[-]$	Koeficient uložení kuličkového šroubu
$k_K$	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tuhost šroubu v krutu
$k_{MS}$	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tuhost mezi maticí s šroubem
$k_T$	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tuhost šroubu v tahu
$k_U$	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tuhost uložení
$K_S$	$[\text{m}]$	Převod kuličkového šroubu
$l$	$[\text{m}]$	Délka zdvihu os

$l_k$	[m]	Vzdálenost uložení konců kuličkového šroubu
$L_S$	[m]	Délka kuličkového šroubu
$m$	[kg]	Hmotnost zátěže, připojené na pohon osy
$M_j$	[Nm]	Jmenovitý točivý moment motoru
$M_{max}$	[Nm]	Maximální pracovní moment
$M_{prac}$	[Nm]	Pracovní moment
$M_{stat}$	[Nm]	Statický moment
$M_T$	[Nm]	Celkový třecí moment
$M_{TM}$	[Nm]	Třecí moment kuličkové matice
$M_{TS}$	[Nm]	Třecí moment na šroubu
$M_{TU}$	[Nm]	Třecí moment ložiska
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky kuličkového šroubu
$n_k$	[min <sup>-1</sup> ]	Kritické otáčky kuličkového šroubu
$n_{max}$	[min <sup>-1</sup> ]	Maximální otáčky kuličkového šroubu
$N$	[-]	Počet impulsů na otáčku snímače
$P$	[m]	Stoupání kuličkového šroubu
$P_j$	[W]	Jmenovitý výkon motoru
$P_M$	[W]	Potřebný výkon motoru
$v$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu os
$v_{lim}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Maximální možná rychlost posuvu
$x_I$	[m]	Základní inkrement odměřování
$\alpha$	[°]	Úhel sklonu šroubu
$\varepsilon$	[rad·s <sup>-2</sup> ]	Úhlové zrychlení
$\kappa$	[N·m <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> ]	Koeficient úměrnosti
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota materiálu

$\omega$	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	Úhlová rychlost
ABS		Akrylonitril – butadien – styren
AC		Alternating current (střídavý proud)
CAD		Computer aided design (počítačem podporované projektování)
CNC		Computer numerical control (číslicové řízení počítačem)
CO <sub>2</sub>		Oxid uhličitý
EC		Electronically commutated (elektronicky komutované)
HMI		Human – machine interface (rozhraní člověk – stroj)
KVS		Katedra výrobních systémů
NC		Numerical control (číslicové řízení)
NCU		Numerical control unit (číslicová řídicí jednotka)
PLC		Programmable logic controller (programovatelný řídicí automat)
TTL		Through the lens (skrz optiku)
TUL		Technická univerzita v Liberci

# 1. Úvod

Nejrozšířenějším způsobem zpracování plechů je stříhání a jemu příbuzné technologie pro dělení materiálu (vystřihování, ostřihování apod.). V minulosti byly pro účely vytváření otvorů nebo různě tvarovaných polotovarů či hotových výrobků z materiálu ve formě plechu využívány převážně lisovací střížní nástroje. Takové nástroje jsou ale jednoúčelové – je třeba vyrobit pro každý tvar a velikost výstřižku jeden nástroj, a to z drahé konstrukční oceli. Proto se tato technologie z ekonomického hlediska vyplatí až u sériové a hromadné výroby.

Vynález laseru použitelného pro průmyslové účely dal ve spojení s číslicovým řízením (CNC) technologiím zpracování plechu zcela nový rozměr. Laserové řezací stroje umožňují do plechu vyříznout libovolně složitý tvar s dobrou přesností, rychlostí a kvalitou řezu. Vyráběný tvar lze rychle změnit přehozením NC programu v řídicím systému, což umožňuje použití těchto strojů i pro kusovou a malosériovou výrobu či tvorbu funkčních prototypů. Narozdíl od lisů nevznikají při provozu strojů na řezání laserem žádné významné síly, proto nejsou na tyto stroje tak velké konstrukční nároky. Technologie řezání laserem, dříve řazená mezi nekonvenční metody dělení materiálu, je dnes ve výrobních podnicích velmi rozšířená.

Na Katedře výrobních systémů Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci byly možnosti laserového řezání plechů testovány na prototypu víceúčelového CNC stroje. Tento stroj byl navržen a zkonstruován v rámci disertační práce Ing. Petra Zeleného, Ph.D. [1]. Jedná se o menší stroj portálové konstrukce, s rámem složeným z hliníkových profilů. Pracovní prostor stroje má rozměry 200×200×150 mm. Posuv všech pracovních os je řešen ozubenými řemeny, poháněnými servomotory. Laserové zařízení bylo pro tento stroj navrženo v diplomové práci Jaroslava Bataly Aplikace laseru u prototypu CNC stroje [2]. Více o tomto zařízení pojednává kapitola 5.1.

Nyní se katedra rozhodla pro postavení dalšího podobného stroje, ale s mnohem větším pracovním prostorem a vyšší přesností. Právě návrhu a konstrukci tohoto stroje se věnuje tato diplomová práce. Některé součásti pro stavbu stroje má již KVS k dispozici a jsou blíže popsány v kapitole 5.

## 2. Cíle práce

Hlavním cílem této diplomové práce je navrhnout konstrukci funkčního prototypu CNC stroje pro laserové řezání plechů a následně ji i zrealizovat. Tento stroj by měl mít pracovní rozsah  $1200 \times 1500 \times 500$  mm, přesnost polohování 0,01 mm a rychlost koncového prvku  $10 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$ . Zdvih pracovní osy Z – 500 mm – je na první pohled pro účely řezání plechů zbytečně velký. Je však zvolen proto, že se do budoucna počítá s využitím navrhovaného stroje jako modelářské frézky (po osazení vysokorychlostním frézovacím vřetenem).

V teoretické části práce budou popsány některé komerčně vyráběné stroje podobné velikosti a použití (modelovací frézky, laserové řezací stroje), které mohou sloužit pro inspiraci ke konstrukci či k porovnání se zde navrženým strojem. Dále budou použity zkušenosti z konstrukce podobného stroje, zmíněného v úvodu. Problematika navrhování a realizace takového stroje je poměrně obsáhlá a náročná. Například zmíněnému prototypu na KVS se věnovalo kromě disertační práce i několik diplomových a bakalářských prací. Proto se bude tato práce zabývat hlavně základní mechanickou konstrukcí – návrhem rámu stroje, připojení lineárních jednotek, pohonů a laserové hlavy. V ideálním případě by se měl tento stroj i oživit a otestovat zkušebními řezy.



### 3. Laser, laserové řezání

Slovo „laser“ je původně anglickou zkratkou pro Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, v překladu „zesilování světla pomocí stimulované (vynucené) emise záření“ [3]. Jedná se o zdroj monochromatického a koherentního záření (tj. s jedním směrem kmitání, frekvencí i fází), využívající jevu stimulované emise elektromagnetického záření aktivních částic buzených vnějším zdrojem energie. Pro generaci laserového paprsku je nezbytné dosažení inverze populace (nerovnovážného stavu rozdělení) energetických hladin aktivního prostředí.

Laser se skládá z aktivního prostředí, optického rezonátoru a zdroje budící energie. Podle druhu aktivního prostředí se lasery dělí na plynové, pevnolátkové, polovodičové, kapalinové a chemické. Optický rezonátor je tvořen zpravidla dvěma či více zrcadly, z nichž alespoň jedno je polopropustné. Zdroj energie může být například výbojka, elektrický výboj v aktivním prostředí, proud elektronů nebo i chemická reakce. Podle druhu činnosti se lasery dělí na kontinuální a pulzní. [4]

Laser dnes nachází uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti. V medicíně se například využívá ve stomatologii nebo pro operace zraku. V elektronice ho lze nalézt v zařízeních pro čtení/zapisování optických disků, v počítačových myších, tiskárnách, pro datové přenosy optickými vlákny nebo pro měření vzdálenosti či rychlosti. Také jeho technologické využití v průmyslu je široké – řezání laserem, laserové svařování, gravírování nebo vrtání.

Laserové řezání, ke kterému se bude využívat stroj navrhovaný v této diplomové práci, je technologické využití laseru pro dělení materiálu. Díky vysoké hustotě záření laserového paprsku, soustředěného na malou plochu o průměru 10 až 100  $\mu\text{m}$ , dochází k roztavování a odpařování řezaného materiálu. Při řezání kovů se přivádějí reaktivní plyny (například kyslík). Dochází pak k exotermické reakci, zabezpečující většinu energie k řezání. Při řezání nekovových materiálů se do místa řezu přivádí inertní plyn (dusík, argon), který slouží pouze pro odstranění roztaveného materiálu. [4]

## 4. Příklady podobných strojů

Při každé konstrukční práci je účelné se inspirovat současným stavem techniky a její nabídky na trhu nebo z něj přímo vycházet. Proto v následujících kapitolách budou uvedeny příklady některých strojů, které mají podobný účel nebo konstrukci jako navrhovaný stroj. Protože ten nemusí sloužit pouze pro laserové zpracování (řezání) plechů, ale předpokládá se i možné osazení vřetenem pro frézování, budou uvedeny kromě strojů pro řezání laserem i příklady modelovacích frézek podobných konstrukcí.

### 4.1 Modelovací frézky

#### 4.1.1 CAM 1520 Premium

Tato modelovací frézka od německé firmy vhf camfacture AG se vyznačuje vysokou tuhostí a přesností (opakovaná přesnost polohování:  $\pm 0,01$  mm). Základem je portálová konstrukce lineárních jednotek s bezvůlovými kuličkovými šrouby s dvojitým lineárním vedením, přičemž dvě rovnoběžné jednotky jsou použity pro osu Y. Rozsah polohování je 1550×2010×490 mm. Základová konstrukce z vysoce pevných hliníkových profilů zaručuje vysokou tuhost při nízké hmotnosti a vysoké nosnosti. Pro snadné upínání obrobků a příslušenství je k dispozici masivní stůl složený z profilů s T-drážkami. Stroj nachází použití zejména v náročných průmyslových aplikacích jako obrábění dřeva, plastů a kovů, tvorba forem nebo rapid prototyping.



Obr. 1 – Frézka CAM 2030 (stejná konstrukce jako CAM 1520, jen jiné rozměry) [5]

#### 4.1.2 FlatCom M50

Konstrukce modelářské frézky FlatCom M50, kterou vyrábí německá společnost isel Germany AG, je založena na speciálních hliníkových profilech, které dávají dobrou tuhost při současně nízké hmotnosti. Také zde je použito obvyklé portálové uspořádání os, přičemž osa Y je dvojitá a umístěná na úrovni pracovního stolu. Spojení s podélnou osou X je provedeno stojnami, které vytvářejí světlou výšku portálu 300 mm. Rozsah pojezdu jednotlivých os je 1200×1400×250 mm. K polohování lineárních os jsou použity bezvůlové kuličkové šrouby 16×10 mm, poháněné bezúdržbovými EC servomotory. Díky tomu stroj dosahuje opakované přesnosti polohování  $\pm 0,02$  mm při rychlosti opracování  $15 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$ . Frézka je vhodná například pro tvorbu designových modelů, architektonických modelů, hliníkových čelních panelů, v reklamě apod. Použitelné materiály jsou hlavně hliník, neželezné kovy, dřevo a plasty.

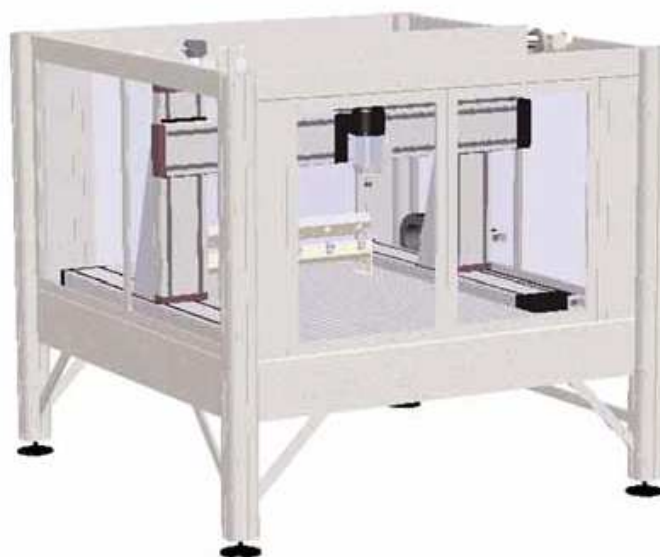


Obr. 2 – Modelářská frézka FlatCom M50 [6]

#### 4.1.3 GPY 138/158

Mnoho aplikací vyžaduje koncept stroje, který je na jednu stranu univerzální, a na druhou stranu nabízí dlouhé pojezdy pro zpracování velkých ploch. To nabízí právě modelářská frézka GPY 138/158 od německé firmy imes-icore GmbH. Zvláštností tohoto CNC stroje je dvojitá osa Z s velkou světlou výškou portálu. Tím se liší od ostatních podobných strojů, které mají většinou jednu osu Z, umístěnou na pojezdovém vozíku podélné osy X, a na které je pak připevněno frézovací vřeteno. Jinak je konstrukce klasická – robustní, z hliníkových profilů, v průmyslovém provedení.

Rozsah polohování os je 1380×1580×580 mm. Pro všechny osy jsou použity AC servomotory a kuličkové šrouby 16×5 mm. Opakovaná přesnost polohování je  $\pm 0,02$  mm. Standardní rychlost posuvu je  $8 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$ , volitelně až  $25 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$ . Rozsah aplikací tohoto stroje je opět široký – rapid prototyping, tvorba velkých a designových modelů, zpracování dřeva, laserová digitalizace, kopírovací frézování apod. Materiály, které je frézka schopna zpracovat, jsou velmi podobné jako u ostatních podobných strojů – hliník, dřevo, plasty (ABS, polystyren), sádra.



Obr. 3 – Modelovací frézka řady GPY s ochranným krytem [7]

#### 4.1.4 Porovnání modelovacích frézek

Název	Pracovní rozsah	Rychlost pol.	Přesnost	Typ pohonu
CAM 1520 Premium	1550×2010×490 mm	<i>nezjištěno</i>	$\pm 0,01$ mm	kul. šrouby
FlatCom M50	1200×1400×250 mm	$15 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$	$\pm 0,02$ mm	kul. šrouby, EC
GPY 138/158	1380×1580×580 mm	$8 (25) \text{ m} \times \text{min}^{-1}$	$\pm 0,02$ mm	kul. šrouby, AC

Tab. 1 – Porovnání popsaných modelovacích frézek

## 4.2 Laserové řezací stroje

### 4.2.1 TruLaser 1030

Tento stroj od společnosti TRUMPF se vyznačuje nízkými investičními a provozními náklady, velmi snadnou obsluhou a malými nároky na prostor (pouze  $25 \text{ m}^2$ ). Řezání zajišťuje 2kW difúzně chlazený  $\text{CO}_2$  laser TruCoax. Se simultánní rychlostí os  $85 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$  může TruLaser 1030 řezat konstrukční ocel o tloušťce až 15 mm (ušlechtilá ocel 6 mm, hliník

5 mm). Pracovní rozsah os stroje je 3000×1500×75 mm. Stroj je vhodný například pro začátečníky, kteří chtějí provádět dříve outsourcovanou práci vlastními prostředky nebo z cenových důvodů přecházejí z plného materiálu na plech. Díky své flexibilitě umožňuje krátkodobou výrobu, testování změn nebo stavbu prototypů. TruLaser 1030 je rovněž užitečnou investicí jako levný tréninkový stroj.



Obr. 4 – Laserový řezací stroj TruLaser 1030 [8]

#### 4.2.2 PROFILE PLUS 3015

Tento CNC stroj je třetí generací laserových řezacích systémů produkovaných firmou Farley Laserlab. Je vysoce spolehlivý a funkční a má poměrně minimální požadavky na údržbu. Má v sobě integrovaný vyspělý řídicí systém Sinumerik 840D s mobilním ovládacím panelem. Řezací hlava je umístěna na vysoce stabilním samonosném rameni, uloženém na lité frémě s kvalitními lineárními vedeními.



Obr. 5 – Celkový pohled na laserový řezací stroj PROFILE PLUS 3015 [9]

Pracovní plocha stroje má rozměry 3000×1500 mm a je osvětlená. Precizní pohony kuličkovými šrouby umožňují maximální rychlost pojezdu v osách X a Y 50 m/min (v ose Z 10 m×min<sup>-1</sup>), přičemž maximální řezací rychlost pro ocel je 9 m×min<sup>-1</sup> a pro papír 30 m×min<sup>-1</sup>. Dosahuje přitom opakované přesnosti polohování ±0,02 mm. Standardní výbavou jsou výměnné stoly, které umožňují zvýšit produktivitu práce o 30 až 50 %.

#### 4.2.3 M-1600

Laserový řezací stroj M-1600, produkováný německou společností Eurolaser GmbH, dosahuje prvotřídních výsledků řezání. Ani gravírování není pro tento systém žádný problém. Laserový systém je založen na modulárním konceptu, takže všechny důležité jednotky mohou být vyměněny. Pracovní stůl o rozměrech 1300×1600 mm je možné rozdělit do dvou sekcí. Díky tomu je možné v přední části stolu materiál řezat nebo gravírovat a zároveň ze zadní části odebírat materiál zpracovaný nebo zakládat nový, což výrazně zvyšuje produktivitu stroje. Vysoce kvalitní CO<sub>2</sub> laserový zdroj je prakticky bezúdržbový. Jeho výkon může být v rozmezí 60 až 600 W. Rychlost řezání je možná až do 60 m×min<sup>-1</sup>. Stroj je vhodný pro řezání například dřeva, textilií, akrylových pryskyřic nebo fólií.



Obr. 6 – Laserový řezací stroj M-1600 [10]

#### 4.2.4 Salvagnini L3-30

Salvagnini L3-30 je stroj pro laserové řezání od italské společnosti Salvagnini, která je světovou špičkou v dodávce komplexních řešení pro zpracování plechu. Vlákenný laser, použitý u tohoto stroje, má oproti klasickým CO<sub>2</sub> laserům řadu výhod. Odpadá zde potřeba optických cest a laserového plynu, nevyžaduje prakticky žádnou údržbu. Úspora energie je až 75 % oproti CO<sub>2</sub> laserům. Umožňuje řezat i vysoce reflektivní materiály jako mosaz nebo

měď (do tloušťky 5 mm). Konstrukční ocel lze řezat až do tloušťky 15 mm, nerez do 10 mm a hliník do 8 mm. Velikost pracovního stolu je 3048×1524 mm, zdvih osy Z je 100 mm. Princip nosného ramene přispívá k velmi tuhé konstrukci a umožňuje rychlé a přesné polohování a snadný přístup ke zpracovávané součásti. Maximální rychlost polohování je vysoká – až  $120 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$ , opakovaná přesnost polohování je  $\pm 0,03 \text{ mm}$ .



Obr. 7 – Laserový řezací stroj Salvagnini L3-30 [11]

#### 4.2.5 Porovnání laserových řezacích strojů

Název stroje	Pracovní rozsah	Rychlost pol.	Přesnost	Typ laseru
TruLaser 1030	3000×1500×75 mm	$85 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$	<i>nezjištěno</i>	CO <sub>2</sub>
Profile Plus 3015	3000×1500 mm	$50 (10) \text{ m} \times \text{min}^{-1}$	$\pm 0,02 \text{ mm}$	<i>nezjištěno</i>
M-1600	1300×1600 mm	$60 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$	<i>nezjištěno</i>	CO <sub>2</sub>
Salvagnini L3-30	3048×1524×100 mm	$120 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$	$\pm 0,03 \text{ mm}$	vláknový

Tab. 2 – Porovnání popsaných strojů pro laserové řezání



## 5. Dostupné součásti

V této kapitole budou popsány součásti, které má již KVS pro stavbu navrhovaného stroje k dispozici.

### 5.1 Laserové zařízení

Zařízení pro generování laserového paprsku, které má Katedra výrobních systémů k dispozici pro navrhovaný stroj, má označení JK 400 FL. Je produktem britské společnosti GSI Group. Toto zařízení bylo pro účely řezání laserem vybráno v rámci diplomové práce Jaroslava Bataly Aplikace laseru u prototypu CNC stroje [2].

Jde o kontinuální, yterbiem dopovaný vláknový laser třídy IV, určený nejen pro řezání, ale i svařování nebo přesné vrtání. Hlavní částí je kompaktní laserový zdroj o rozměrech 222×433×450 mm a hmotnosti 35 kg. Jmenovitý výkon laseru je 400 W, který se dá regulovat od 10 do 100%. Účinnost se pohybuje okolo 25 %. Vlnová délka vyzařovaného paprsku (nepolarizovaného) je od 1070 do 1090 nm, modulační frekvence až 50 kHz. Pro svůj provoz potřebuje střídavé jednofázové napětí o velikosti 100 až 240 V při frekvenci od 47 do 63 Hz. Maximální příkon zdroje je 1600 W. Dále je třeba zajistit externí chlazení čistou vodou v otevřeném okruhu s minimálním průtokem  $6 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . Voda, vstupující do zdroje přípojkou v jeho zadním panelu, musí mít teplotu od 18 do 28°C, pH v rozmezí od 6,5 do 8,8 a nesmí u ní docházet ke kondenzaci (musí být tedy ve stavu nad rosným bodem). [12]



Obr. 8 – Laserový zdroj JK 400 FL

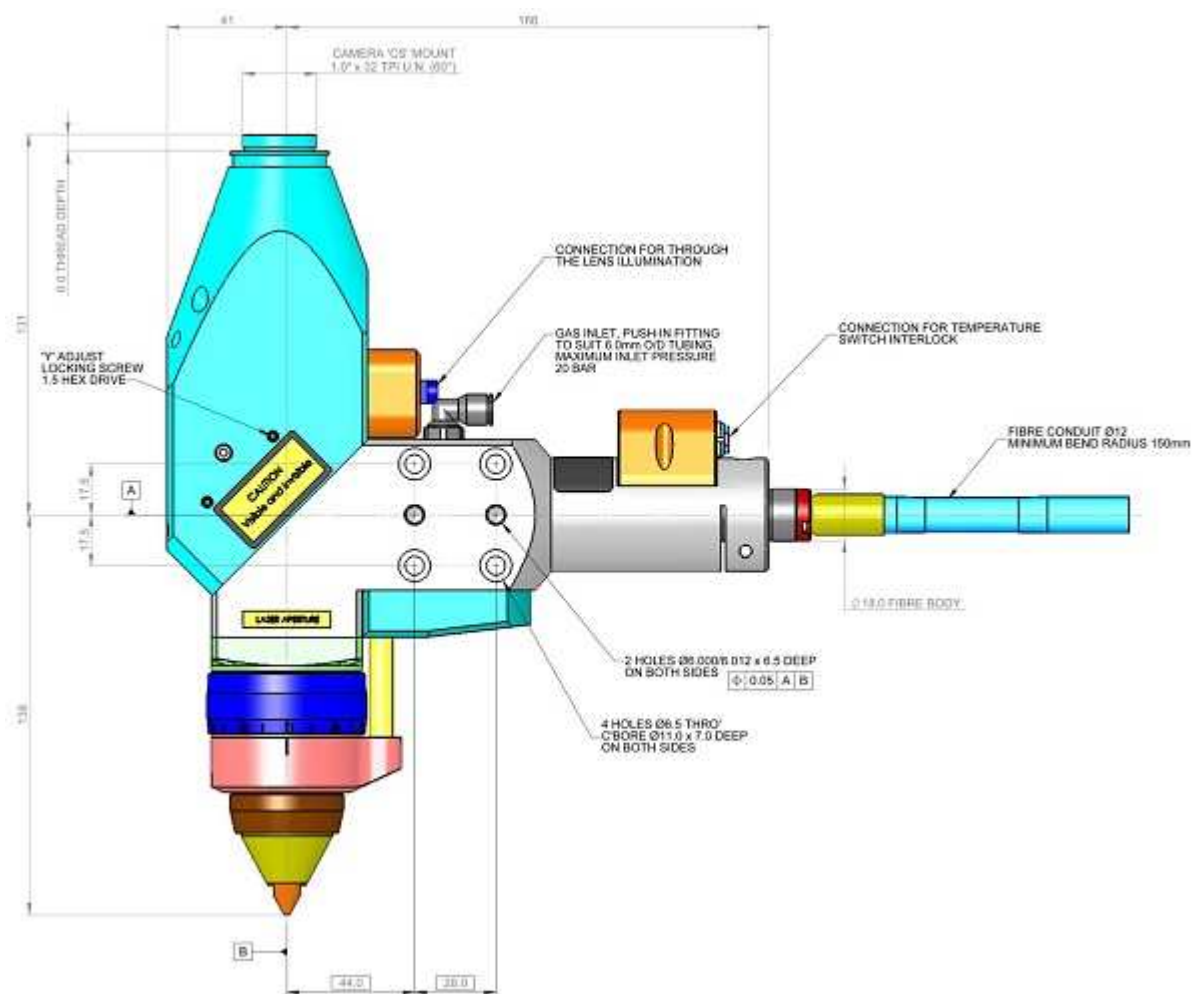
Laserový paprsek je veden z výstupu laserového zdroje k řezací hlavě optickým vláknem. Přestože kabel optického vlákna je určen do průmyslového prostředí a vypadá na první pohled podobně jako běžný elektrický kabel, vyžaduje mnohem šetrnější zacházení. Je nutné zachovat v celé jeho délce minimální poloměr ohybu 75 mm. Za zadní částí laserového zdroje, odkud optický kabel vychází, je třeba nechat alespoň 100 mm volného prostoru. Při



pohybu by kabel neměl ležet na podlaze ani se někde odírat a měl by být podepřený po celé své délce.

Připojení kabelu optického vlákna k řezací hlavě je řešeno speciální koncovkou, se kterou musí být také zacházeno velmi šetrně. Dosažení správné polohy koncovky k přípojce v hlavě je řešeno drážkou a perem, proti uvolnění je zde použit svěrný spoj s šroubem. Koncovka je dále vybavena speciální technologií Luminator, která zabraňuje zpětnému odrazu laserového paprsku a tím i poškození celého zařízení.

Koncovkou součástí laserového zařízení je ocelová řezací hlava s ohniskovou vzdáleností 76 mm. Umožňuje nastavit řeznou stopu v rozmezí od 8 do 60  $\mu\text{m}$ . Nastavení se provádí manuálně pomocí kroužku nad řezací tryskou. Laserový paprsek se centruje na hrot trysky dvěma seřizovacími šrouby. Hlava je dále vybavena otvorem pro přívod pomocného plynu, přípojkou pro kameru a pro TTL osvětlení (skrz optiku). Hmotnost celé hlavy se pohybuje okolo 2,1 kg.



Obr. 9 – Popis a připojovací rozměry řezací hlavy [13]

## 5.2 Servomotory

Pro pohon všech os stroje jsou k dispozici servomotory Siemens 1FK7042-5. Jedná se o velmi kompaktní synchronní motory s permanentním magnetickým polem. Mají jmenovitý výkon 820 W, jmenovitý krouticí moment 2,6 Nm při otáčkách  $3000 \text{ min}^{-1}$  a snesou vysokou míru přetížení. Hmotnost jednoho motoru je 4,9 kg u varianty bez brzdy a 5,4 kg u varianty s brzdou. Napájeny jsou střídavým elektrickým napětím 400 až 480 V z výstupu frekvenčního měniče. Teplo vznikající při provozu je odváděno povrchem motoru, proto nepotřebuje externí chlazení. Pro potřeby přesného odměřování polohy jsou tyto servomotory vybaveny inkrementálním snímačem sin/cos 1 Vpp (2048 pulsů na otáčku). [14]

Výstupní částí motoru je hladká hřídel (bez drážky pro pero) o průměru 19 mm. Pro pohon osy X je k dispozici motor bez brzdy, pro každou lineární jednotku dvojité osy Y jeden motor, také bez brzdy, a pro vertikální osu Z je k dispozici varianta s brzdou. Na obrázku 10 je tento motor připojen k přírubě lineární jednotky. Oranžový kabel je napájecí, zelený přenáší signál od snímače polohy.



Obr. 10 – Pohled na servomotor Siemens 1FK7042-5

## 5.3 Řídicí systém

Pro efektivní CNC řízení celého stroje je nezbytný řídicí systém. Zde bude k tomuto účelu použit SINUMERIK 840D od německé společnosti Siemens. Tento řídicí systém nabízí vysokou modularitu, otevřenost a flexibilitu. Nejlépe se hodí pro střední a vyšší výkonový rozsah. Má k dispozici systémovou platformu pro téměř všechny technologie (soustružení, vrtání, frézování, broušení, niblování, vysekávání, výroba nástrojů a forem atd.) a zvládne jak jednoduché polohovací operace, tak i komplexní víceosé úlohy. Použité integrované certifikované bezpečnostní funkce Sinumerik Safety Integrated garantují vysokou bezpečnost práce strojů i ochranu obsluhy.

Řídicí systém je integrovaný do modulárních frekvenčních měničů Sinamics S120, kterých lze přes rozhraní Drive-CLiQ připojit až šest (při použití NCU 710.1), užitím NCU 720.1 a NCU 730.1 se zvyšuje jejich počet na 31. Výkonné víceprocesorové jednotky NCU (numerical control unit) provádějí operace CNC, HMI, PLC a regulační a komunikační úkoly. Integrovaný software HMI (human machine interface) se používá pro obsluhu, programování a vizualizaci. [15]



Obr. 11 – Řídicí systém Sinumerik 840D a pohonový systém Simodrive 611

Na obrázku 11 vlevo je celkový pohled na řídicí systém v laboratořích KVS. Obrázek vpravo ukazuje modulární pohonový systém Simodrive 611. Největší modul vlevo je napájení. Vedle něj se nachází číslicová řídicí jednotka (NCU). Zbylé dva moduly jsou frekvenční měniče Sinamics S120. K prvnímu z nich lze připojit zároveň dva servomotory, k druhému jeden.

## 5.4 Lineární jednotky

Základem celé konstrukce navrhovaného stroje pro řezání laserem jsou lineární osy, které převádí rotační pohyb hřídele servomotoru na lineární pohyb jezdce řízené osy. Zde budou použity polohovací osy řady BSU 160, které dodává česká firma HIWIN s.r.o. Dle výrobce jsou určeny pro méně náročné aplikace s požadavky na nižší dynamiku pohonu, která

je závislá na kritických otáčkách použitého kuličkového šroubu v závislosti na délce osy. Jedná se o osy s válcovaným kuličkovým šroubem typu R16×10 (průměr×stoupání šroubu). Šroub má přesnost IT7 (52 μm/300 mm). Osy jsou dále vybaveny indukčními koncovými spínači a přírubou pro připojení motoru. [16]

Lineární jednotka pro pohybovou osu X má maximální zdvih 1500 mm, celkovou délku 1820 mm a hmotnost cca 53 kg. Protože se jedná o portálovou konstrukci, jsou k dispozici dvě lineární jednotky pro osu Y. Mají maximální zdvih 1200 mm, celkovou délku 1520 mm a přibližnou hmotnost 44 kg. Pro osu Z bude použita lineární jednotka o maximálním pracovním zdvihu 500 mm, celkové délce 820 mm a hmotnosti cca 24 kg.



Obr. 12 – Lineární polohovací jednotky řady BSU 160

## 6. Konstrukce rámu stroje

### 6.1 Rámy strojů

Rám je nosná soustava a základní část konstrukce každého stroje. Upevňuje se na něj většina jeho součástí, přenáší síly mezi nimi a tlumí chvění a rázy vznikající při provozu. Základním požadavkem na rám každého stroje je vysoká tuhost, a to jak statická (odolnost vůči statickému namáhání), tak dynamická (odolnost vůči kmitání). Tuhost podstatně ovlivňuje výslednou přesnost práce stroje.

Pro konstrukci obráběcích strojů se nejčastěji používají rámy odlité z šedé litiny nebo svařované z ocelových profilů a plechů. Výhodou odlitých ráků je větší schopnost tlumit chvění a rázy. Také lze přímo na nich vytvářet obráběním vodící plochy. Při zachování požadavku stejné tuhosti mají ale vždy vyšší hmotnost než svařované rámy, a to z důvodu nižšího modulu pružnosti litiny oproti oceli. Výroba svařenců je rychlejší, protože zde odpadá nutnost tvorby modelu. Svařované rámy jsou vhodné spíše pro kusovou výrobu, odlévané rámy pro výrobu sériovou. [17]

Alternativně se pro konstrukci obráběcích strojů využívá vylévání vnitřků ocelových či litinových ráků betonem nebo polymerbetonem, který má mnohem lepší dynamické a tepelné vlastnosti než ocel či litina. Dále se pro tyto konstrukce využívá přírodní žula, jejíž výhodou je vysoká tuhost, odolnost proti opotřebení a nízká teplotní roztažnost. Její obvyklé využití je ale spíše u měřicích než obráběcích strojů.

Pro konstrukci ráků strojů, u kterých nedochází ke vzniku větších řezných nebo jiných provozních sil, se dá s úspěchem využít profilů z hliníku a jeho slitin. Příkladem takových strojů mohou být modelovací frézky pro obrábění lehkých kovů, dřeva nebo plastů. Dále se hliníkové profily používají při stavbě jednoúčelových strojů, výrobních linek nebo ochranných ráků strojů a pracovišť. Výhodou těchto stavebních prvků jsou příznivé mechanické vlastnosti při současné nízké hmotnosti, široká paleta standardních profilů i k nim připojitelného příslušenství, snadná montáž, demontáž a přestavitelnost konstrukcí.

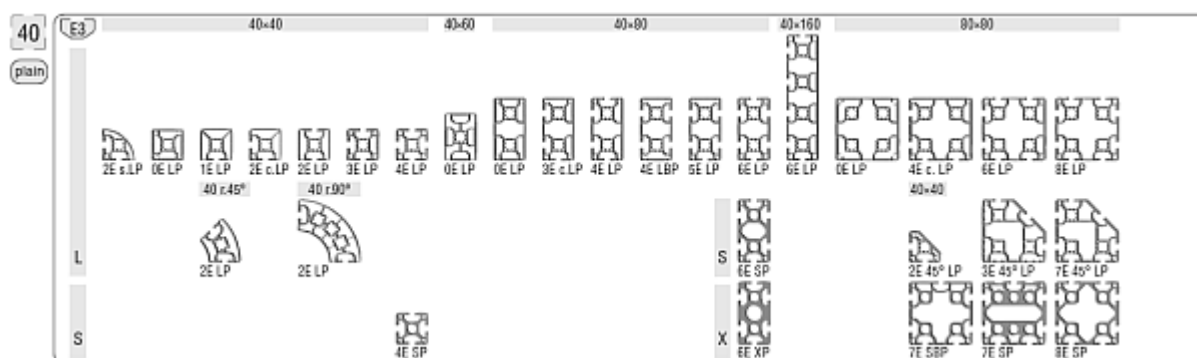
Mezi nejvýznamnější výrobce konstrukčních systémů na bázi hliníkových profilů patří německé společnosti item Industrietechnik GmbH, MayTec Aluminium Systemtechnik GmbH a skupina Bosch Rexroth, a švýcarská společnost KANYA Ltd. Jediným českým výrobcem takového stavebnicového systému je ALUTEC K&K a.s. se sídlem v Čelákovících.



## 6.2 Profilový systém MayTec

Pro konstrukci rámu navrhovaného stroje pro řezání laserem byl vybrán stavebnicový systém hliníkových profilů od společnosti MayTec, která má v České republice zastoupení nedaleko Liberce – v Lučanech nad Nisou – v podobě firmy moas cs s.r.o. Jedná se o komplexní profilový systém, ve kterém se všechny profily mohou kombinovat v podstatě libovolným způsobem. Díky široké škále příslušenství poskytuje tento systém efektivní řešení pro mnoho aplikací.

Jako u každého podobného stavebnicového systému, i zde je základem bohatá paleta profilových tyčí, vyráběná technologií protlačování hliníku. Pro konstrukci jsou k dispozici skupiny profilů s modulem 16, 20, 30, 40, 45, 50 a 60. Tento rozměr odpovídá délce strany základního čtvercového profilu dané skupiny, případně rozteč mezi drážkami, pokud jich má tyč na jedné straně více. Ke každé skupině profilů přísluší určitý typ drážky s označením H, F, E3 a E4. Většina profilů existuje ve variantě s povrchovou drážkou či bez ní (hladké), u některých typů si lze vybrat mezi těžkým nebo lehkým profilem (označení S/L). Dále existují například profily, které na jedné či více stranách nemají drážky vůbec. Kromě klasických čtvercových a obdélníkových tyčí jsou v nabídce i tyče s profilem šestihranným, osmihranným, trubkovým nebo válcovým, případně s jednou stranou zaoblenou či zkosenou.



Obr. 13 – Ukázka profilů řady 40 z katalogu MayTec [18]

Důležitou součástí celého systému jsou spojovací prvky, kterými se jednotlivé profily na sebe navazují. Existují spojovací prvky pro všechny možné druhy spojení – čelní, úhlové, křížové, podélné, prodlužování atd. Základním prvkem pro spojování profilů je tzv. univerzální spojka (obr. 14). Skládá se z kotvy s pružinou, křížového čepu a závrtného šroubu. Talířovité zakončení kotvy se používá pro čelní spojení, přičemž připojovaný profil může být vzhledem k ose kotvy jakkoliv natočený. Kotva se čtvercovou hlavou má nejvyšší únosnost. Kotvu se zakončením ve tvaru T lze použít pro následné vložení do uzavřené

sestavy profilů. Velmi široké použití má zakončení kotvy se závitem. Pro šikmé spojení se používá kotva ze zakončením ohnutým o  $45^\circ$ , případně umístěným na čepu, který umožňuje plynulé natočení v rozsahu  $0^\circ$  až  $45^\circ$ .

Pro montáž je pak třeba vytvořit v jednom ze spojovaných profilů zahloubení pro křížový čep. Kotva se následně vloží do středového otvoru profilu a do otvoru v křížovém čepu, a její zakončení se zasune do drážky připojovaného profilu. Celý spoj se pak utáhne zašroubováním závrtného šroubu do křížového čepu, přičemž šroub zapadá do šikmé drážky v kotvě, kterou tímto zatlačuje hlouběji do středového otvoru.



Obr. 14 – Univerzální spojka MayTec [18]

Další možností, jak čelně spojovat profily, jsou spojky šroubového typu. Šroub s čokovkou hlavou se zašroubuje do středového otvoru profilu buď přímo (nutný předem vytvořený závit), nebo přes závitovou vložku, případně se použije samořezný šroub. Skrz celý připojovaný profil je pak nutné vytvořit otvor pro vložení šroubováku.

Spojky bajonetového typu jsou způsobem čelního spojování profilů bez nutnosti obrábění. Narozdíl od ostatních spojek se nekládají do středového otvoru, ale přímo do drážky. Respektive do drážky se zavrtá samořezná vložka, do ní se vsune imbusový šroub a na něj se našroubuje T-matice. Další možností spojení profilů bez obrábění jsou úhelníkové spojky, zinkové nebo polyamidové.



Obr. 15 – Spojka bajonetového typu; úhelníková spojka [18]

Kromě spojovacích prvků nabízí stavebnicový systém MayTec ještě celou řadu příslušenství. Jsou to například různé krycí a těsnící profily, stavitelné patky a základové nohy, pojezdová kolečka, oka pro hák jeřábu, rukojeti, závěsy, kladky, drátěné mříže, rošty či jiné výplně. Samozřejmostí v nabídce jsou i nástroje potřebné pro realizaci spojení, jako jsou vrtáky, záhlubníky, závitníky, vrtací pouzdra nebo imbusové klíče.

Kromě klasického profilového systému vyrábí MayTec i systémy pro čisté provozy (elektrotechnika, lékařství, potravinářský průmysl). Vyznačují se absencí drážek, ve kterých by mohly zůstat nečistoty. Praktickým produktem tohoto výrobce je také trubkový svorkový systém, umožňující vytvářet například nastavitelné (otočné) stojany a stoly.

### 6.3 Návrh rámu

Pro návrh nejen rámu, ale i celého stroje, byl použit parametrický 3D CAD systém Pro/Engineer Wildfire 2 se školní licencí. Nejprve byl tedy vytvořen 3D model rámu stroje. Velkou pomoc při jeho tvorbě představoval katalog CAD dat od firmy MayTec, umístěný na serveru PART Community (<http://maytec.partcommunity.com>). Umožňuje vygenerovat 2D i 3D data většiny součástí, které společnost produkuje, a to ve všech běžných CAD formátech.

Hlavním profilem, který byl použit pro všechny části konstrukce rámu (kromě šikmých příček), je čtvercový profil 80×80 8ESP. Na každé straně má dvě drážky typu E3, jejichž rozteč je 40 mm. Jedná se o těžší verzi této velikosti profilu. Celkem bylo pro stavbu rámu použito pět délkových variant tohoto profilu.

Základem celé nosné soustavy stroje jsou čtyři stojny o délce 590 mm, každá v jednom rohu rámu. Vedou od spodní plochy konstrukce a nahoře jsou připevněny k vodorovnému profilu o délce 1820 mm, který dále slouží k připevnění lineárních jednotek osy Y. Připojení těchto profilů je v přední části rámu řešeno čtyřmi univerzálními spojkami (jsou popsány v předchozí kapitole), po dvou na každém boku příslušné stojny. V zadní části bylo možno použít pouze tři spojky (dvě z boku a jedna vzadu), protože ke stojnám jsou zde ze dvou stran připojeny šikmé příčky.

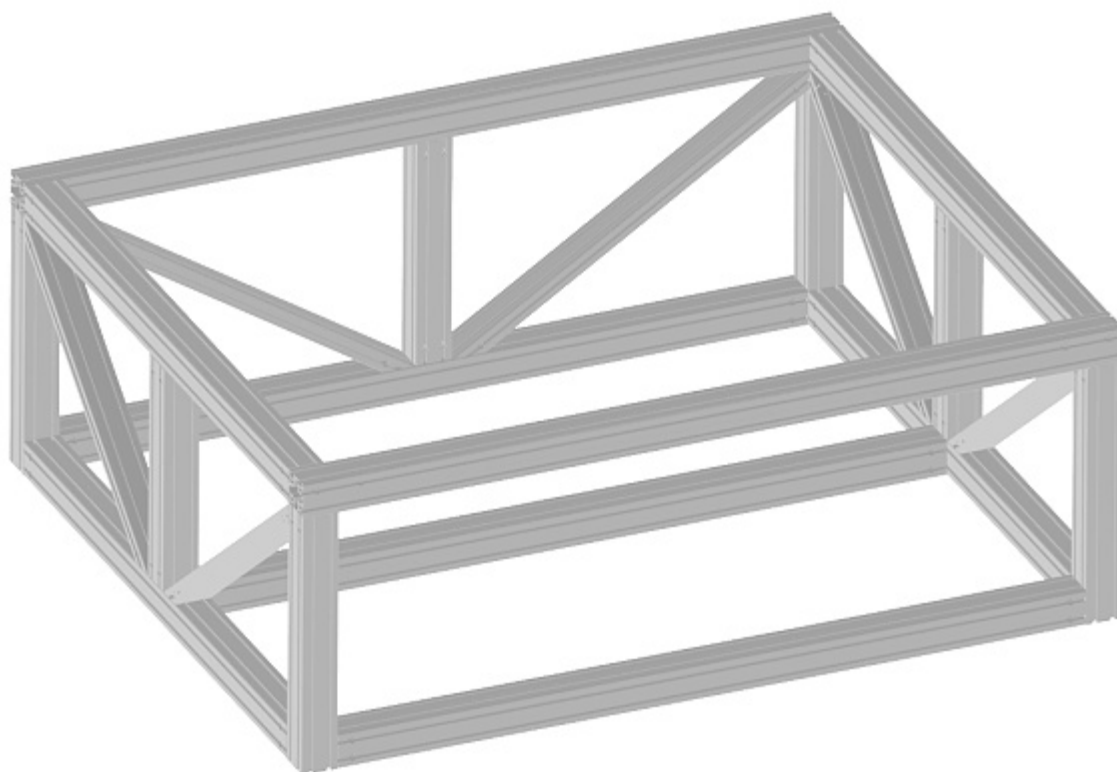
Ve spodní části jsou stojny navzájem spojeny vepředu a vzadu profily o délce 1660 mm a z bočních stran profily délky 1360 mm. Dohromady tak tvoří uzavřený obdélník o vnějších rozměrech 1820×1520 mm (z půdorysu). Tyto rozměry odpovídají délkám lineárních jednotek pro osy X a Y. Uprostřed tohoto obdélníku je ještě jeden profil o délce 1660 mm, který bude sloužit hlavně k podepření upínacího roštu. Všechny tyto spodní profily jsou připevněny k stojnám vždy čtyřmi univerzálními spojkami. Zahloubení pro křížové čepy



univerzálních spojek jsou umístěna na bočních stranách profilů, a to kvůli snadné montáži přímo v konečné poloze.

Pod lineárními jednotkami dvojité osy Y jsou umístěny profily délky 1360 mm, připojené k výše zmíněným vodorovným profilům o délce 1820 mm. Tvoří dohromady také uzavřený obdélník. Stejně jako většina ostatních profilů jsou i tyto připojeny čelně čtyřmi univerzálními spojkami na každé straně profilu. Pro minimalizaci průhybu lineárních jednotek jsou umístěny mezi horními a spodními bočními profily svislé výztužné profily o délce 510 mm, a to přesně v polovině. Stejný svislý profil je umístěn i na zadní straně rámu.

Pro zvýšení tuhosti rámu jsou jeho boční strany a zadní strana vyztuženy šikmými příčkami, a to po dvou na každé z těchto stran. Tvoří je obdélníkový profil 40×80 6ELP. Jsou vždy seříznuty tak, aby jedním koncem přiléhaly ke stojně a druhým koncem ke spodním vodorovným profilům, spojujícím navzájem stojny. Příčky na bočních stranách mají délku 818,3 mm a na zadní straně rámu 940,3 mm. Připojení těchto příček je řešeno spojkami s kotvou, která má talířovité zakončení umístěné na čepu, a umožňuje jeho natočení v požadovaném úhlu. Na každém konci šikmé příčky jsou použity dvě tyto spojky, po jedné na každém boku profilu.



Obr. 16 – 3D model navrženého rámu z hliníkových profilů

## 6.4 Výpočet hmotnosti rámu

Hmotnost rámu navrhovaného stroje byla stanovena součtem hmotností všech jeho částí – hliníkových profilů, univerzálních spojek, spojek s kloubem pro šikmé spoje a součástí pro připojení lineárních jednotek osy Y (paralelní spojka závitového typu a destička se závitem). Toto připojení je podrobně popsáno v následující kapitole. Při výpočtu nebyla uvažována hmotnost hliníku, odebraného frézováním zahloubení pro křížové čepy spojek, která je vzhledem k hmotnosti ostatních součástí zanedbatelná.

Název	Hmotnost 1 ks [kg]	Počet	Hmotnost celkem [kg]
Profil 80×80 8ESP délky 1820 mm	10,74	2	21,48
Profil 80×80 8ESP délky 1660 mm	9,79	3	29,37
Profil 80×80 8ESP délky 1360 mm	8,02	4	32,08
Profil 80×80 8ESP délky 590 mm	3,48	4	13,92
Profil 80×80 8ESP délky 510 mm	3,01	3	9,03
Profil 40×80 6ELP délky 818,3 mm	1,94	4	7,76
Profil 40×80 6ELP délky 940,3 mm	2,24	2	4,48
Univerzální spojka	0,064	94	6,02
Šikmá spojka	0,063	24	1,51
Paralelní spojka šroubového typu	0,048	8	0,38
Destička se závitem (těžký typ)	0,017	8	0,14

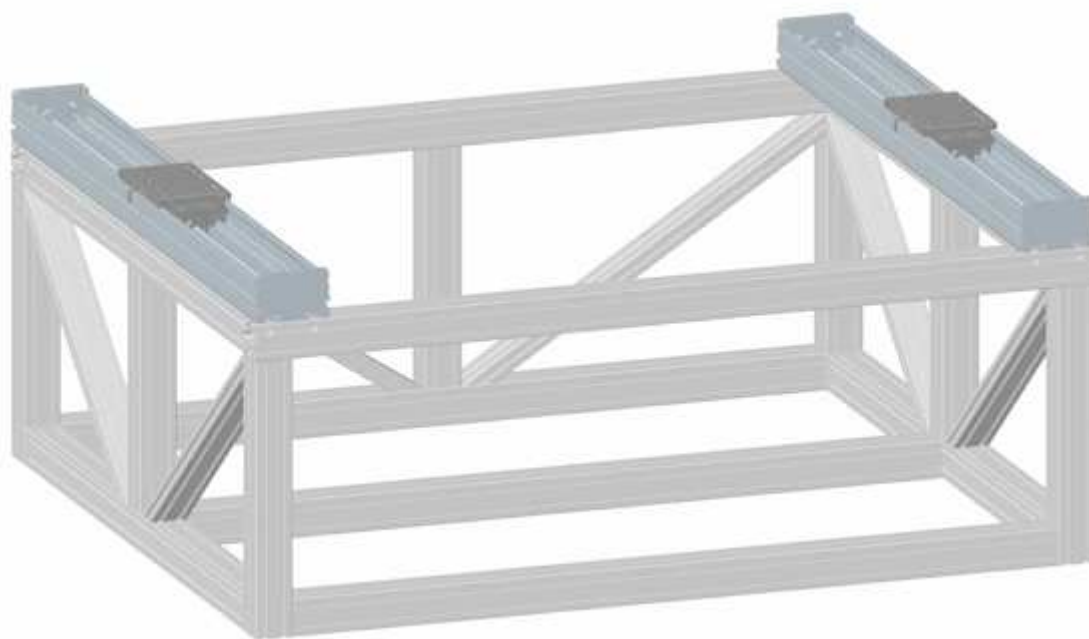
Tab. 3 – Dílčí hmotnosti součástí rámu stroje

Součtem všech dílčích hmotností docházíme k výsledku, že hmotnost celého rámu stroje je 126,17 kg.

## 7. Připojení polohovacího systému

### 7.1 Připojení lineárních jednotek osy Y k rámu

Na rám sestavený z hliníkových profilů budou nejprve připojeny dvě navzájem rovnoběžné lineární jednotky (tzv. gantry) představující pohybovou osu Y. Jejich umístění je na bočních stranách horní plochy rámu a jsou orientované tak, aby jejich vozíky byly v horizontální poloze a hřídel, kterou se připojuje kuličkový šroub k motoru, byla na zadní straně konstrukce.

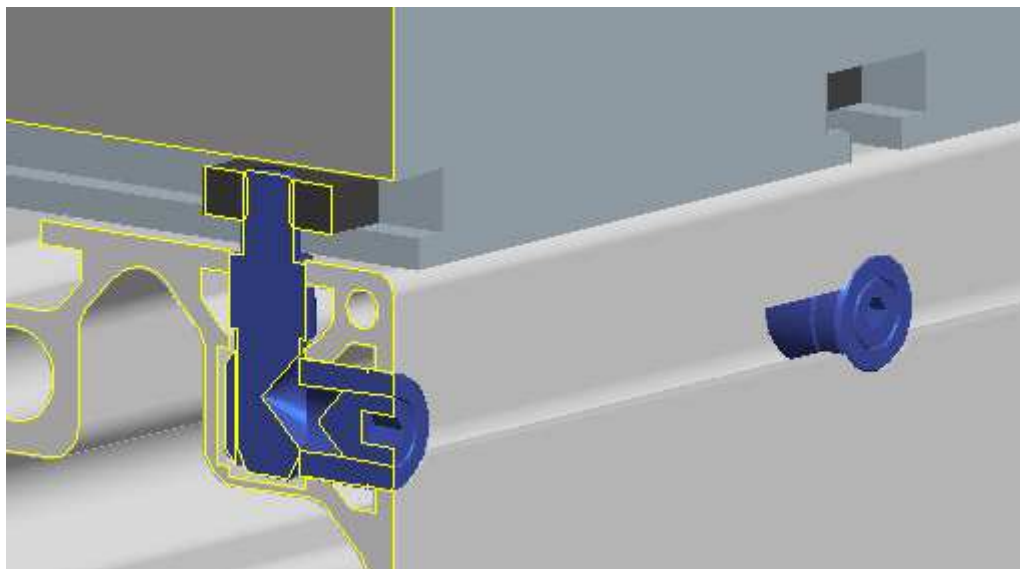


Obr. 17 – Umístění lineárních jednotek osy Y na rámu

Poněkud problematické bylo upevnění lineárních jednotek k rámu. Mají totiž atypickou rozteč drážek 97 mm, díky čemuž nepasují přímo na drážky žádného z hliníkových profilů. Nejdříve byla zvažována možnost upevnění přes adaptační desku s otvory přesně vyvrtanými tak, aby umožnily její přišroubování ke spodní straně lineární jednotky a zároveň k horní ploše rohové stojny rámu. Nakonec byla zvolena výrobně mnohem jednodušší varianta s připojením přímo na vodorovný profil 80×80 8ESP o délce 1820 mm tak, že jejich drážky jsou navzájem kolmé.

V sortimentu společnosti MayTec se nachází spojky i pro tento typ připojení (tzv. paralelní spojky). Protože drážky v lineárních jednotkách nejsou stejné jako drážky použitých hliníkových profilů, nebylo možné použít standardní kotvu s talířovým zakončením ani

křížovou spojku, ale byla zvolena kotva s koncovým závitem M8×11. Přes ten byla přišroubována k destičce se závitem a pružinou, zasunuté do drážky v jednotce.



Obr. 18 – Model připojení lineární jednotky k rámu

Každá ze dvou lineárních jednotek osy Y je připevněna k rámu čtyřmi těmito spojkami, po dvou na každém konci. Pro jejich montáž je třeba zhotovit zahluubení o průměru 15 mm a hloubce 28 mm z čelní strany profilu (pro křížové čepy) a o průměru 12 mm a hloubce 29 mm z horní strany profilu (pro kotvu). Protože tento typ uchycení má určitou vůli a nezaručuje přesnou vzájemnou rovnoběžnost lineárních jednotek, která je nezbytně nutná pro správný chod stroje, bude této rovnoběžnosti dosaženo vyrovnaním při montáži.

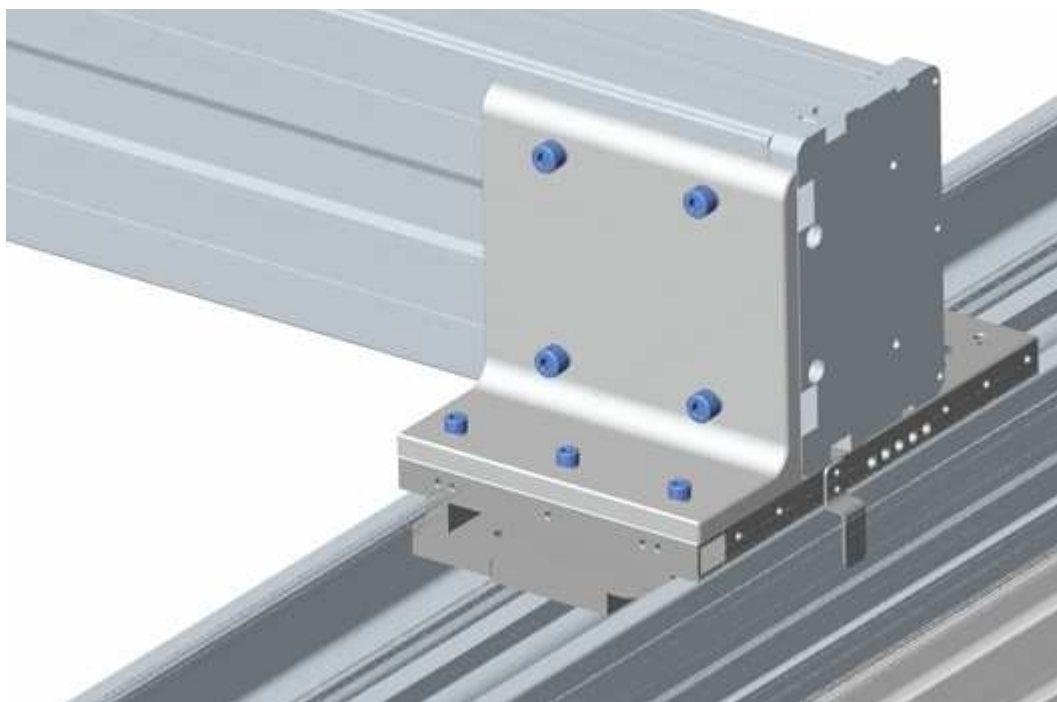
## 7.2 Připojení lineární jednotky osy X

Na jezdcě lineárních jednotek dvojité osy Y se dále umístí lineární jednotka s rozsahem polohování 1500 mm, představující pohybovou osu X. Společně tak budou tvořit portálové uspořádání konstrukce. Jednotka bude orientována tak, že delší strany jejího obdélníkového profilu budou svislé. Díky tomu bude mít jednotka menší průhyb, než by měla při stejné orientaci, jako mají jednotky osy Y. Jezdec této jednotky bude směrem dopředu, hřídel pro připojení motoru bude vystupovat na pravé straně a koncové spínače budou na vrchní straně jednotky.

Pro spojení lineární jednotky osy X s jezdcí osy Y byl navržen ocelový spojovací L-profil (viz obr. 19). Bude použit stejný na obou koncích jednotky. Spodní plochou bude dosedat na jezdcu, čelní plochou na bok lineární jednotky. Upevnění profilu k jezdcí bude provedeno třemi šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem M6x25, které budou

zašroubovány do závitových děr v jezdcí. Pod hlavy šroubů budou umístěny pružné podložky, aby se zabránilo jejich uvolnění. K lineární jednotce bude L-profil připojen pomocí čtyř šroubů stejného typu o rozměru M8x22. Také tyto šrouby budou pojištěny proti uvolnění pružnými podložkami. Zašroubovány budou do destiček ze závitem a pružinou (stejných jako u připojení jednotek osy Y k rámu), nasunutých do drážek v lineární jednotce.

Výrobní výkres uvedeného spojovacího L-profilu je v Příloze 7.



Obr. 19 – Model připojení lineární jednotky osy X

### 7.3 Připojení lineární jednotky osy Z

Lineární jednotka pro svislou osu Z bude připojena na lineární jednotku osy X, a to tak, že jejich jezdcé budou vzájemně směřovat k sobě. Dále bude jednotka orientovaná tak, aby hřídel pro připojení servomotoru ke kuličkovému šroubu směřovala nahoru.

Vzájemné propojení jezdců obou lineárních jednotek bude zajišťovat hliníková spojovací deska o tloušťce 10 mm. Výrobní výkres této desky je v Příloze 6. Její celkové rozměry jsou 250×250 mm, což koresponduje s délkami jezdců. V dolní části bude mít deska po obou stranách vyříznutí kopírující obrys lineárních jednotek, aby se maximalizoval možný zdvih v ose X. Připevněna bude celkem dvanácti šrouby M6x25, po šesti pro každý jezdec, s pružnými podložkami proti uvolnění.

Aby bylo dosaženo kolmosti obou spojovaných os, budou jezdcé slícovány s deskou válcovými kolíky 6×20 mm. Budou celkem čtyři, dva pro každý jezdec. Pro tento účel budou

v desce zhotoveny přesné díry. Na druhé straně budou kolíky zapadat do shodných děr v jezdcích.



Obr. 20 – Pohled ze dvou směrů na připojení lineární jednotky osy Z

## 7.4 Hřídelová spojka

Ke spojení hřídele lineární jednotky s hřídelí servomotoru byla u všech pohybových jednotek použita vlnovcová spojka TOOLFEX typu M velikosti 20 od německé společnosti KTR Kupplungstechnik GmbH. Spojka je bezvůlová, bezúdržbová, vysoce torzně tuhá a zároveň má nízký moment setrvačnosti. Upevnění spojky k hřídeli je třecí, svěrným spojem s radiálním upínacím šroubem M5×20. Díky dvěma drážkám v náboji nedochází k deformaci vlnovce při utahování spoje. Vlnovec je vyroben z korozi-vzdorné oceli, náboj je hliníkový. Spojka umožňuje trvale přenášet krouticí moment až 15 Nm při otáčkách až 11 950 min<sup>-1</sup>. Díky vlnovci spojka umožňuje vzájemné posunutí spojených hřídelí ±0,6 mm v axiálním směru, 0,2 mm v radiálním směru a vzájemné úhlové natočení 1,5 °.

Standardní rozsah vnitřních průměrů nábojů spojky je 8 až 20 mm. Protože průměr vstupní hřídele lineárních jednotek je 6 mm, byly tyto spojky objednány bez děr v náboji, které se do nich zhotovily až v laboratořích KVS. Díry o průměru 6 mm byly nejprve vyvrtány na stolní vrtačce a poté ručně vystruženy. Díry pro hřídel servomotoru o průměru 19 mm byly vyfrézovány na soustružnicko-frézovacím centru Mazak Integrex 100-IV.



Obr. 21 – Vlnovcová spojka TOOLFLEX typu M [19]

Výrobce udává hmotnost spojky při maximálních průměrech obou děr 144 g. Po přičtení hmotnosti dutých válců, představujících rozdíl mezi maximálním a skutečným průměrem díry (na jedné straně  $\varnothing 20/\varnothing 6$ , na druhé  $\varnothing 20/\varnothing 19$ , oba o délce 21,5 mm) činí hmotnost spojky 163 g. Stejným způsobem se upraví i hodnota momentu setrvačnosti, která je dle katalogu  $32 \times 10^{-6} \text{ kg} \times \text{m}^2$ . Přičtením výše zmíněných dutých válců tato hodnota vzroste na  $36,5 \times 10^{-6} \text{ kg} \times \text{m}^2$ .

## 7.5 Příruba

Pro spojení těles všech čtyř lineárních jednotek s příslušnými servomotory byly použity duralové příruby, dodané firmou HIWIN s.r.o. na zakázku. Tvar jejího zakončení, kterým dosedá na čelní plochu motoru, přesně kopíruje tvar motoru. Vzdálenost ploch, kterými dosedají na čelní plochy motoru a lineární jednotky, je 73 mm. Vnitřní průměr příruby, uvnitř které je po montáži umístěná spojka popsaná v předchozí kapitole, je 45 mm.



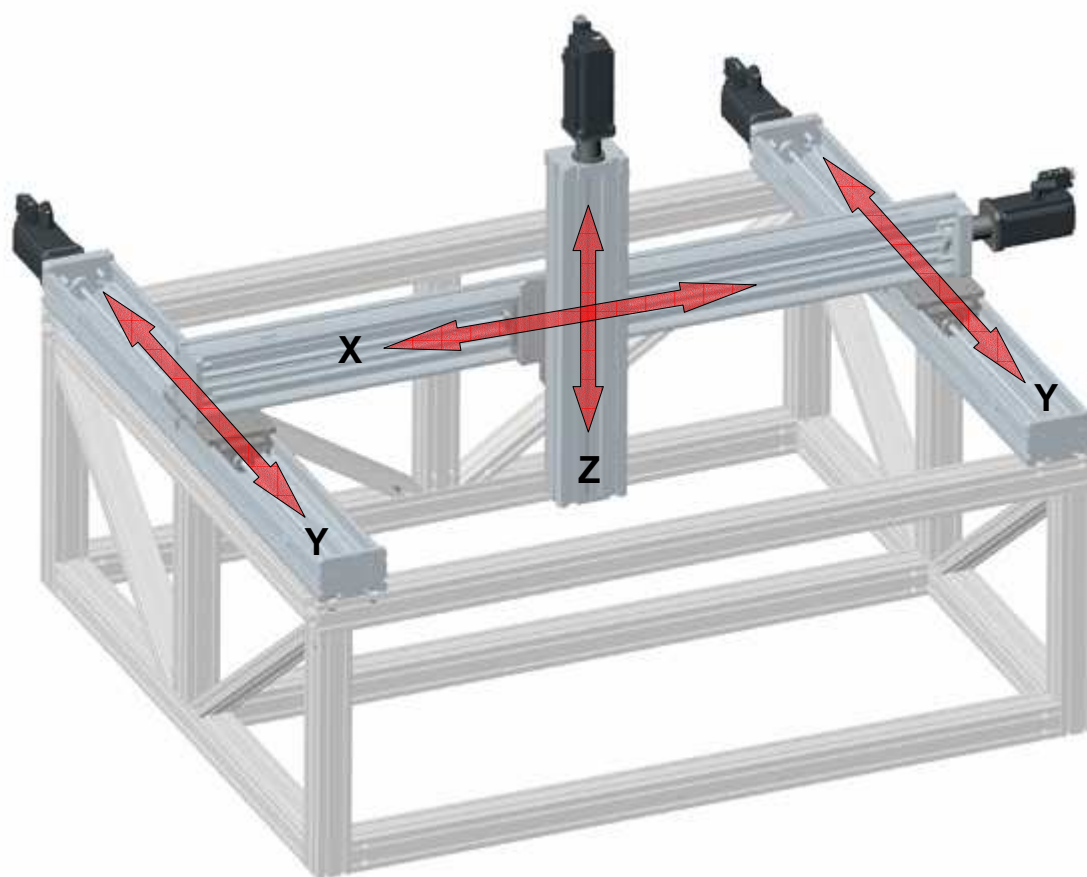
Obr. 22 – Model příruby pro spojení lineárních jednotek s motory



Protože upínací šroub spojky při rotaci „škrtal“ o přírubu, musela být jeho hlava mírně zbroušena. Také drážka v těle příruby byla frézováním prodloužena, aby bylo možné šroub spojky po nasunutí hřídele motoru vůbec utáhnout. Příruba se připevňuje k lineárním jednotkám šesti šrouby M4×20. K servomotoru se příruba připevňuje čtyřmi šrouby M6×16, přičemž závity jsou vytvořeny v jejím tělese.

## 7.6 Stroj s připojeným polohovacím systémem

Z celkového hlediska tvoří rám stroje uzavřenou konstrukci, která má obecně mnohem větší tuhost než konstrukce otevřená. Nevýhodou je mírně ztížený přístup do pracovního prostoru stroje. Po umístění lineárních jednotek na rám vznikne portálová konstrukce se světlou výškou 700 mm. Rozsah polohování os X a Y bude konstrukcí omezen na 1315×1080 mm, v ose Z zůstane původní, tj. 500 mm. V koncové poloze osy Z bude vzdálenost její spodní plochy od spodních profilů rámu 120 mm.



Obr. 23 – Model rámu stroje s připojeným polohovacím systémem



## 7.7 Výpočet hmotnosti polohovacího systému a celého stroje

Jedním z důležitých údajů každého stroje je jeho celková hmotnost. Tento údaj je důležitý například z důvodu zatížení podlahy místnosti, ve které je stroj umístěn, nebo pro možnosti transportu stroje. V Tabulce 4 jsou uvedeny hmotnosti jednotlivých součástí polohovacího systému stroje. Tyto dílčí hmotnosti budou použity nejen pro výpočet celkové hmotnosti stroje, ale i pro výpočet posuvných hmot na jednotlivých osách, což je důležitý údaj pro výpočet pohonů.

Název	Hmotnost 1 ks [kg]	Počet	Hmotnost celkem [kg]
Lineární jednotka osy X	52,8	1	52,8
Lineární jednotka osy Y	44,1	2	88,2
Lineární jednotka osy Z	23,8	1	23,8
(z toho jezdec lineární jednotky)	(7)		
Servomotor bez brzdy	4,9	3	14,7
Servomotor s brzdou	5,4	1	5,4
Příruba	0,32	4	1,28
Pružná spojka	0,16	4	0,64
Laserová hlava	2,1	1	2,1
Spojovací deska os X a Z	1,56	1	1,56
Spojovací L-profil os X a Y	2,63	2	5,26
Kryt osy X	0,44	2	0,88
Kryt osy Y	0,36	4	1,44
Kryt osy Z	0,22	2	0,44
Šroub M6×16	0,007	16	0,112
Šroub M4×20	0,003	24	0,072
Šroub M6×25	0,009	18	0,162
Šroub M8×22	0,016	8	0,128
Kolík 6×20	0,004	4	0,016
Pružná podložka 6	0,0004	18	0,007
Pružná podložka 8	0,001	8	0,008
Destička se závitem	0,016	8	0,128
Šroub M6×50	0,014	2	0,028
T-matice M6	0,005	2	0,01

Tab. 4 – Dílčí hmotnosti součástí polohovacího systému stroje

Součet uvedených dílčích hmotností dává dohromady hmotnost polohovacího systému, a to 199,2 kg. Po přičtení hmotnosti rámu vychází celková hmotnost stroje 325,4 kg. Jedná se o hmotnost pouze samotné konstrukce bez kabelů, řídicího systému a laserové jednotky. Dále se bude hmotnost jistě zvětšovat i o upínač plechů, krytování pracovního prostoru stroje, vedení kabelů apod. Návrh těchto součástí však není předmětem této diplomové práce.

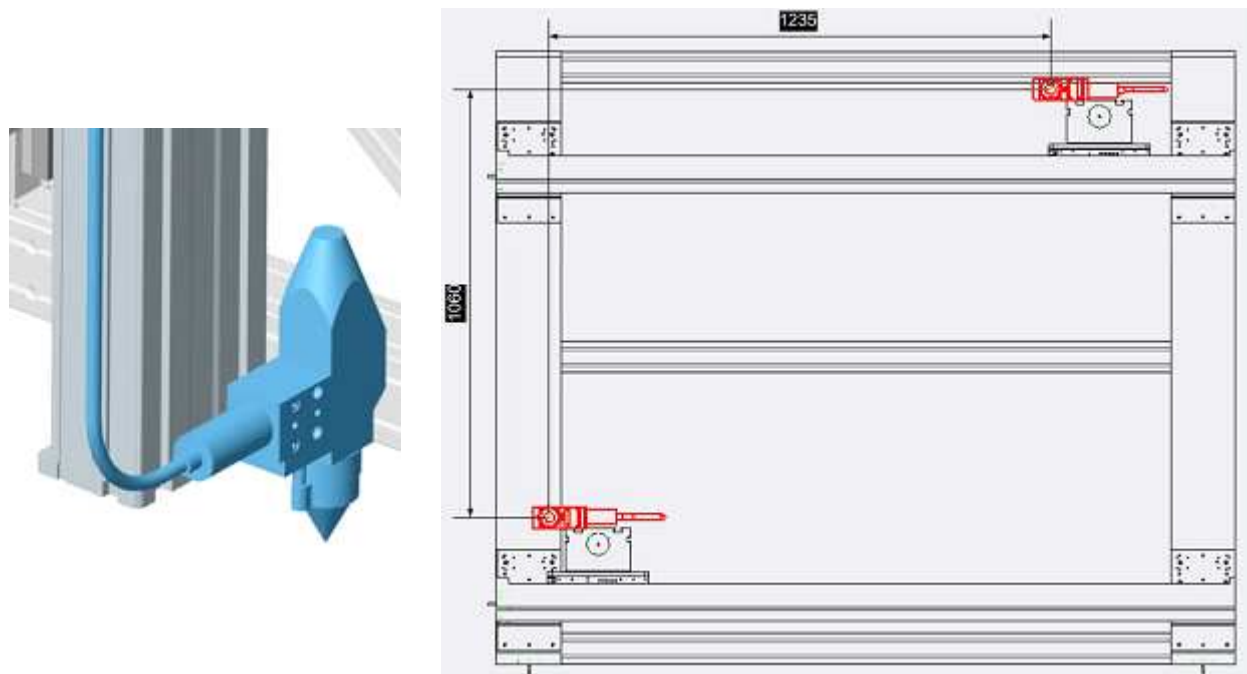
## 8. Připojení laserové jednotky

Osazení navrhovaného stroje zařízením pro generování laserového paprsku, popsaného blíže v kapitole 5.1, se skládá ze dvou oblastí. Tou první je upevnění laserové hlavy jako koncového prvku k lineární jednotce pohybové osy Z. Druhou oblastí je vedení optického kabelu, který přivádí laserový paprsek ze zdroje do řezací hlavy.

### 8.1 Upevnění laserové hlavy

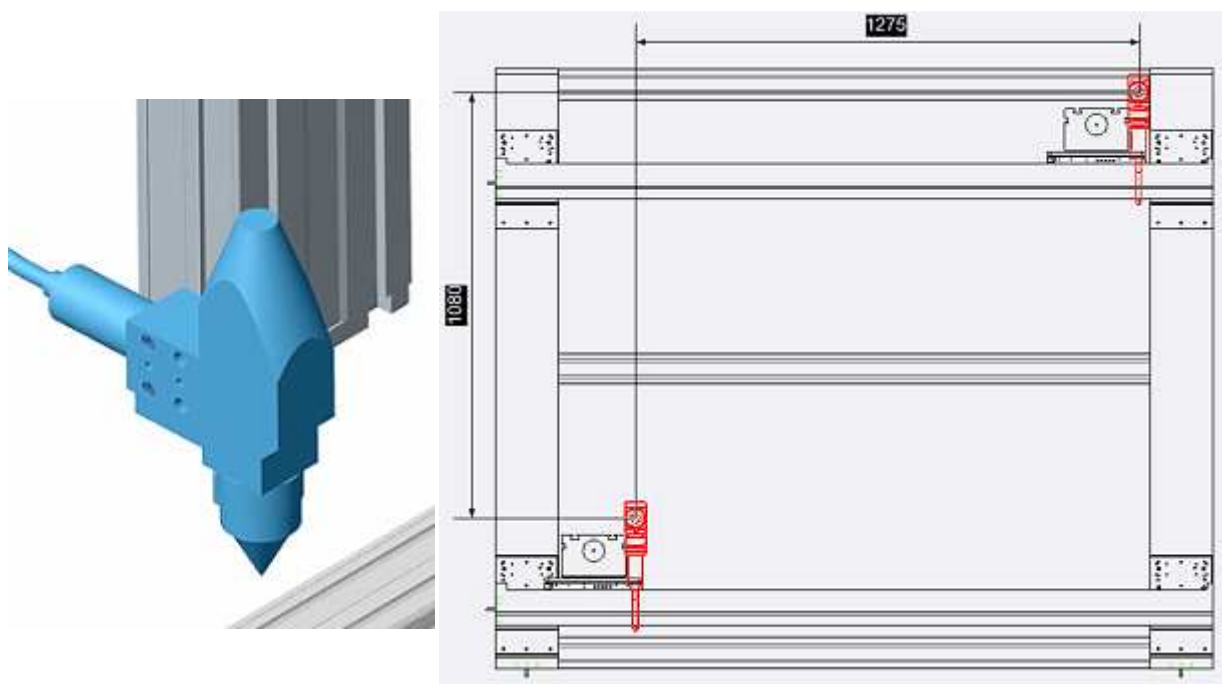
Návrh upevnění řezací hlavy vychází ze způsobu, kterým byla tato součást upevněna na prototypu víceúčelového CNC stroje v laboratořích KVS. Zde byla hlava jednoduše přišroubována do drážky hliníkového profilu osy Z dvěma šrouby s T-maticemi. I lineární jednotka osy Z navrhovaného stroje má na sobě podélné T-drážky, které budou použity k připevnění laserové hlavy. Protože drážky jsou na čelní i boční straně jednotky, nabízí se dvě možné varianty upevnění.

U první varianty je hlava upevněna na čelní straně jednotky. Jsou použity dva šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem M6×55 s příslušnými T-maticemi. Hlava těchto šroubů je celá zapuštěná do zahlbubení v těle laserové hlavy. Při tomto umístění hlavy vzniká pracovní prostor v osách X–Y 1060×1235, jak ukazuje následující obrázek.



Obr. 24 – Varianta 1 – umístění hlavy a vzniklý pracovní prostor

Druhou možností je upevnit laserovou hlavu na levou stranu lineární jednotky (na pravé straně je umístěn koncový spínač). Drážky na bočních stranách jsou menší. Proto jsou zde použity šrouby stejného typu jako u první varianty, ale o rozměru M6×50. Také T-matice je třeba použít menší. Při tomto umístění hlavy vzniká pracovní prostor v osách X–Y 1080×1275, jak ukazuje obrázek 25.



Obr. 25 – Varianta 2 – umístění hlavy a vzniklý pracovní prostor

Z důvodu menšího omezení rozsahu polohování byla vybrána druhá varianta umístění řezací hlavy. Narozdíl od první varianty je zde také možnost využít zadní stěnu lineární jednotky osy Y pro vedení optického kabelu.

## 8.2 Vedení optického kabelu

Optický kabel vede laserový paprsek z laserového zdroje do řezací hlavy. Je velmi křehké, a případné náklady na jeho opravu nebo výměnu by byly vysoké. Proto platí některé zásady pro jeho používání (viz kapitola 5.1). Například minimální poloměr ohybu kabelu je 75 mm, vlákno by se nemělo na žádném místě odírat a mělo by být podepřeno v celé své délce.

U prototypu víceúčelového CNC stroje, umístěného v laboratoři KVS, je vedení kabelu řešeno spíše provizorně. Nejdříve vede volně do výšky cca 3 m, kde je zavěšeno na dvou drátových okách, vzdálených od sebe přibližně 0,5 m, a odtud je spuštěno volně k laserové hlavě.

Způsob vedení optického kabelu u navrhovaného prototypu bude řešen podobně, ale místo drátových ok se použijí dva vyvažovače (balancery). Vyvažovače jsou primárně určeny pro zavěšení různého nářadí, například na výrobních linkách nebo v dílnách, a snižují tak namáhavost práce a nároky na pracovní prostor. Jejich přitažením dolů nebo přizvednutím lze plynule měnit výšku zavěšení.

Pro zavěšení optického kabelu bude použit vyvažovač TECNA 9311. Má nosnost 0,4 až 1 kg, návín 1600 mm a hmotnost 0,6 kg. Protože vnitřní průměr karabiny pro zavěšení břemena je pouze 6 mm, bude nutné ji nahradit za větší, minimálně s průměrem 15 mm. První vyvažovač bude upevněn ke stropu místnosti přibližně nad pravým zadním rohem stroje, druhý nad laserovým zdrojem.



Obr. 26 –Vyvažovač TECNA 9311 [20]

## 9. Výpočet pohonů

Protože jednotlivé součásti pro stavbu servopohonů navrhovaného stroje byly již vybrány, následující výpočty pouze ověřují, zda vyhovují všem požadavkům. Pokud je výsledek některého z výpočtů nevyhovující, jsou stanoveny podmínky, za kterých je možno daný pohon provozovat.

### 9.1 Zásady pro návrh polohových servopohonů

Konstrukční návrh mechanické části pohonu má výrazný vliv na výslednou kvalitu celého servopohonu. Proto byly stanoveny některé požadavky, jejichž dodržení by mělo stačit i k realizaci velmi přesného pohonu. Pořadí, v jakém jsou tyto požadavky uvedeny, odpovídá míře jejich účinku na výsledné vlastnosti pohonu. Pokud nenavrhujeme pohon velmi přesného stroje, lze používat i hodnoty uvedené v závorkách. Překročení některé z mezních hodnot ale může mít za následek vážné nedostatky ve funkci pohonu, případně jeho nefunkčnost. Zásady jsou tedy následující:

- 1) **Minimální vůle.** Celková hystereze polohové smyčky pohonu (vůle a ztráta pohybu vlivem pasivních odporů a konečné tuhosti) by měla být menší než 20 (max. 40) inkrementů odměřování (zpravidla 0,01 mm, max. 0,02 mm).
- 2) **Maximální tuhost.** Vlastní frekvence mechanických částí pohonu  $f_0$  by měla být pro nepřímé pohony (např. kuličkový šroub) větší než 50 Hz (min. 30 Hz), pro přímé pohony (lineární motor) větší než 1500 Hz (min. 800 Hz).
- 3) **Malé pasivní odpory.** Poměr tření za klidu a za pohybu by měl být menší nebo roven jedné, max. 1,2. Celkové pasivní odpory redukované na hřídel motoru mají být menší než 20 % (max. 40 %) trvalého točivého momentu motoru.
- 4) **Přiměřený moment setrvačnosti.** Celkový moment setrvačnosti zátěže (bez momentu setrvačnosti motoru), redukováný na hřídel motoru, by měl být menší než 120 % (max. 300 %, ideálně 80 až 120 %) momentu setrvačnosti motoru. [21]

### 9.2 Výpočet pohonu osy X

#### 9.2.1 Kontrola maximálních otáček

Nejprve je třeba vypočítat otáčky kuličkového šroubu pro zadanou rychlost posuvu os ( $10 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$ ). Určí se podílem této rychlosti a velikosti stoupání šroubu:

$$n = \frac{v}{P} = \frac{10000}{10} = 1000 \text{ min}^{-1} \quad (1)$$

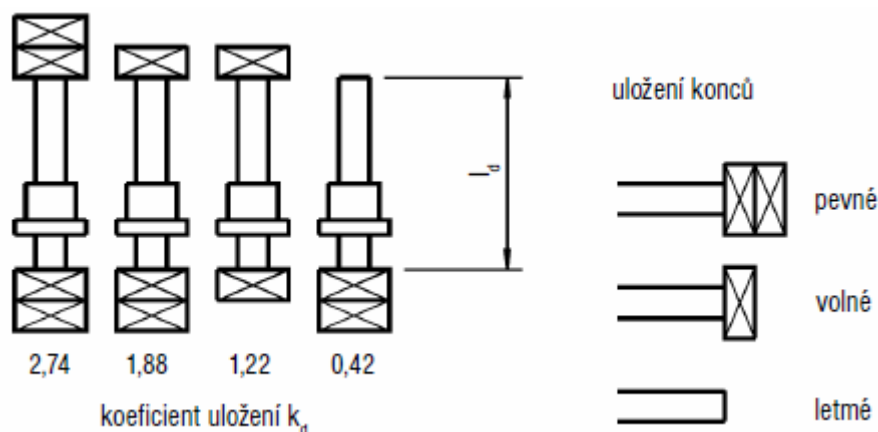
Navržená rychlost je u všech pohybových os stroje stejná, proto tento výsledek platí i pro osy Y a Z. Zároveň jde také o otáčky servomotoru, protože mezi ním a kuličkovým šroubem není žádné ústrojí pro změnu převodového poměru.

Kuličkový šroub by nikdy neměl pracovat v oblasti kritických otáček. Velikost kritických otáček závisí na průměru šroubu  $d$ , vzdálenosti jeho uložení  $l_k$  a na způsobu jeho uložení (2). Maximální pracovní otáčky  $n_{max}$  by neměly přesáhnout 80 % otáček kritických  $n_k$ . Koeficient uložení  $k_d$  se určí podle obrázku 27. Všechny zde použité šrouby jsou na jednom konci podepřeny axiálně-radiálním ložiskem a na druhém konci jen radiálním ložiskem. Koeficient uložení  $k_d$  je tedy roven 1,88.

$$n_{kX} = k_d \cdot \frac{d}{l_{kX}^2} \cdot 10^8 = 1,88 \cdot \frac{16}{1770^2} \cdot 10^8 = 960,13 \text{ min}^{-1} \quad (2)$$

$$n_{max X} = 0,8 \cdot n_{kX} = 0,8 \cdot 960,13 = 768,11 \text{ min}^{-1} < 1000 \text{ min}^{-1} \quad (3)$$

Z výpočtu je patrné, že navržené otáčky šroubu výrazně převyšují jeho maximální pracovní otáčky. Proto bude nezbytné jejich omezení v případě osy X, a to na  $760 \text{ min}^{-1}$ . To odpovídá rychlosti posuvu  $v_X = 7,6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .



Obr. 27 – Určení koeficientu uložení kuličkového šroubu [22]

### 9.2.2 Kontrola posuvové rychlosti

Maximální možná velikost rychlosti posuvu, kterou je možné dosáhnout při zadaném zrychlení a délce zdvihu osy, se vypočítá podle vztahu (4). Zrychlení bylo zvoleno stejné, jako u prvního prototypu CNC stroje na KVS, a to  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

$$v_{X \text{ lim}} = \sqrt{a \cdot l_X} = \sqrt{0,5 \cdot 1,5} = 0,866 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 52 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (4)$$

### 9.2.3 Výpočet tuhosti kuličkového šroubu

**Převod šroubu:**

$$K_s = \frac{P}{2\pi} = \frac{10}{2\pi} = 1,592mm \quad (5)$$

**Tuhost šroubu v tahu:**

- Modul pružnosti v tahu pro ocel:  $E = 2,1 \cdot 10^5 MPa$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 16^2}{4} = 201,06mm^2 \quad (6)$$

$$c_{TX} = 4 \cdot \frac{L_{SX}}{4 \cdot E \cdot A} = 4 \cdot \frac{1770}{4 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 201,06} = 4,192 \cdot 10^{-2} \mu m \cdot N^{-1} \quad (7)$$

$$k_{TX} = \frac{1}{c_{TX}} = \frac{1}{4,192 \cdot 10^{-2}} = 24N \cdot \mu m^{-1} \quad (8)$$

**Tuhost šroubu v krutu:**

- Modul pružnosti ve smyku pro ocel:  $G = 0,81 \cdot 10^5 MPa$

$$c_{KX} = \frac{32 \cdot K_s^2 \cdot L_{SX}}{G \cdot \pi \cdot d^4} = \frac{32 \cdot 1,592^2 \cdot 1770}{0,81 \cdot 10^5 \cdot \pi \cdot 16^4} = 8,608 \cdot 10^{-3} \mu m \cdot N^{-1} \quad (9)$$

$$k_{KX} = \frac{1}{c_{KX}} = \frac{1}{8,608 \cdot 10^{-3}} = 116N \cdot \mu m^{-1} \quad (10)$$

**Tuhost mezi maticí a šroubem:**

Tuhost předepnuté kuličkové matice lze přibližně odhadnout podle empirického vztahu (11), kde  $i$  je počet činných závitů matice a  $\kappa$  koeficient úměrnosti [21]. Matice je zde u všech šroubů stejná, proto je výpočet uveden jen jednou.

$$k_{MS} \approx i \cdot d \cdot \kappa = 4 \cdot 16 \cdot 5 = 320N \cdot \mu m^{-1} \quad (11)$$

**Tuhost uložení:**

Tuhost ložiska ZKLFA1050.2RS – podle katalogu HIWIN kuličkové šrouby [22]:

$$k_U = 325N \cdot \mu m^{-1}$$

Toto axiálně-radiální ložisko je použité u všech tří pohybových os.

**Celková tuhost:**

$$k_X = \frac{1}{\frac{1}{k_{TX}} + \frac{1}{k_{KX}} + \frac{1}{k_{MS}} + \frac{1}{k_U}} = \frac{1}{\frac{1}{24} + \frac{1}{116} + \frac{1}{320} + \frac{1}{325}} = 17,7N \cdot \mu m^{-1} \quad (12)$$



#### Vlastní frekvence kuličkového šroubu:

- Hmotnost zátěže, připojené na pohon osy X (výpočet viz Příloha 3):  $m_X = 42\text{kg}$

$$f_{0X} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_X}{m_X}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{17,7 \cdot 10^6}{42}} = 103,3\text{Hz} > 50\text{Hz} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (13)$$

### 9.2.4 Kontrola přiměřeného momentu setrvačnosti

#### Moment setrvačnosti servomotoru Siemens 1FK7042-5AF71-1DG3:

$$J_{m1} = 3,01 \cdot 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad [14]$$

#### Moment setrvačnosti kuličkového šroubu:

$$J_{SX} = \frac{\pi d^4 L_{SX}}{32} \rho = \frac{\pi \cdot 0,016^4 \cdot 1,77}{32} \cdot 7850 = 8,940 \cdot 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad (14)$$

#### Moment setrvačnosti, redukováný na šroub osy X:

$$\begin{aligned} J_{Xred} &= J_{SX} + m_X \cdot K_S^2 = 8,94 \cdot 10^{-5} + 42 \cdot (1,592 \cdot 10^{-3})^2 = \\ &= 1,958 \cdot 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2 < 3,01 \cdot 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje} \end{aligned} \quad (15)$$

### 9.2.5 Celkový třecí moment šroubu a jeho uložení

#### Třecí moment na šroubu:

- Úhel sklonu šroubu:  $\alpha = 0^\circ$
- Součinitel tření ocel-ocel:  $f = 0,1$

$$\begin{aligned} M_{TSX} &= m_X \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot f \cdot K_S = 42 \cdot 9,81 \cdot \cos 0^\circ \cdot 0,1 \cdot 1,592 \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,066 \text{Nm} \end{aligned} \quad (16)$$

#### Třecí moment ložiska ZKLFA1050.2RS (podle katalogu [22]):

$$M_{TU} = 0,12 \text{Nm}$$

#### Třecí moment předepjaté kuličkové matice (R16-10T3-FSCDIN):

- síla od předepnutí matice:  $F_{Pm} = 0,1 \cdot C_a = 0,1 \cdot 9100 = 910 \text{N}$  (17)

$$M_{TM} = 0,014 \cdot F_{Pm} \cdot \sqrt{d \cdot P} = 0,014 \cdot 910 \cdot \sqrt{0,016 \cdot 0,01} = 0,16 \text{Nm} \quad (18)$$

#### Celkový třecí moment:

- Trvalý točivý moment motoru:  $M_j = 2,6 \text{Nm}$
- Podmínka:  $M_T \leq 0,2 M_j = 0,52 \text{Nm}$

$$\begin{aligned} M_{TX} &= M_{TSX} + M_{TU} + M_{TM} = 0,066 + 0,12 + 0,16 = \\ &= 0,346 \text{Nm} \Rightarrow \text{vyhovuje} \end{aligned} \quad (19)$$

## 9.2.6 Kontrola momentu a výkonu motoru

### Statický a pracovní moment:

Statický moment působí v případě, kdy má pohon nulovou rychlost, a působí na něj pouze třecí síly a nevývažek. U osy X, která má nulový sklon (a tudíž i nulový nevývažek), má tedy stejnou velikost jako moment třecích sil. Pracovní moment se vypočte jako součet statického momentu a momentu od řezné síly. Ta je v případě řezání laserem nulová, proto je zde pracovní moment stejný jako statický.

$$M_{Xstat} = M_{TX} = M_{Xprac} = 0,346 Nm$$

### Dynamický moment:

Přičtením dynamického zatížení (vznikajícího při urychlování a brždění pohonu) k pracovnímu momentu dostaneme maximální pracovní moment, který by neměl přesahovat trvalý pracovní moment motoru.

$$\begin{aligned} M_{Xmax} &= M_{Xprac} + J_{Xred} \cdot \varepsilon = M_{Xprac} + J_{Xred} \cdot \frac{a}{K_s} = \\ &= 0,346 + 1,958 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{0,5}{1,592 \cdot 10^{-3}} = 0,407 Nm < M_j \Rightarrow \text{vyhovuje} \end{aligned} \quad (20)$$

### Potřebný výkon motoru:

- Výkon servomotoru:  $P_j = 820 W$

$$P_{MX} = M_{Xmax} \cdot \omega_{Xmax} = 0,407 \cdot 2\pi \cdot \frac{760}{60} = 32,4 W < P_j \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (21)$$

## 9.2.7 Kontrola přesnosti polohování

Navrhovaný pohon by měl mít dle zadání přesnost polohování alespoň 0,01 mm. Základní inkrement odměřování se pro přímé spojení šroubu a snímače (umístěného v tělese servomotoru na jeho hřídeli) vypočte jako podíl stoupání kuličkového šroubu a počtu impulsů na jednu otáčku snímače (zde inkrementální optický snímač 2048 imp/ot [14]). Výsledek je platný pro všechny tři osy navrhovaného stroje.

$$x_1 = \frac{P}{N} = \frac{10}{2048} = 0,005 mm < 0,01 mm \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (22)$$

## 9.3 Výpočet pohonu osy Y

### 9.3.1 Kontrola maximálních otáček

$$n_{kY} = k_d \cdot \frac{d}{l_{kY}^2} \cdot 10^8 = 1,88 \cdot \frac{16}{1470^2} \cdot 10^8 = 1392 \text{ min}^{-1} \quad (23)$$

$$n_{\max Y} = 0,8 \cdot n_{kY} = 0,8 \cdot 1392 = 1114 \text{ min}^{-1} > 1000 \text{ min}^{-1} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (24)$$

### 9.3.2 Kontrola posuvové rychlosti

$$v_{Y \text{ lim}} = \sqrt{a \cdot l_Y} = \sqrt{0,5 \cdot 1,2} = 0,775 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 46,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (25)$$

### 9.3.3 Výpočet tuhosti kuličkového šroubu

**Tuhost šroubu v tahu:**

$$c_{TY} = 4 \cdot \frac{L_{SY}}{4 \cdot E \cdot A} = 4 \cdot \frac{1470}{4 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 201,06} = 3,482 \cdot 10^{-2} \mu\text{m} \cdot \text{N}^{-1} \quad (26)$$

$$k_{TY} = \frac{1}{c_{TY}} = \frac{1}{3,482 \cdot 10^{-2}} = 29 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1} \quad (27)$$

**Tuhost šroubu v krutu:**

$$c_{KY} = \frac{32 \cdot K_s^2 \cdot L_{SY}}{G \cdot \pi \cdot d^4} = \frac{32 \cdot 1,592^2 \cdot 1470}{0,81 \cdot 10^5 \cdot \pi \cdot 16^4} = 7,149 \cdot 10^{-3} \mu\text{m} \cdot \text{N}^{-1} \quad (28)$$

$$k_{KY} = \frac{1}{c_{KY}} = \frac{1}{7,149 \cdot 10^{-3}} = 140 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1} \quad (29)$$

**Celková tuhost:**

$$k_Y = \frac{1}{\frac{1}{k_{TY}} + \frac{1}{k_{KY}} + \frac{1}{k_{MS}} + \frac{1}{k_U}} = \frac{1}{\frac{1}{29} + \frac{1}{140} + \frac{1}{320} + \frac{1}{325}} = 20,9 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1} \quad (30)$$

**Vlastní frekvence kuličkového šroubu:**

Celková hmotnost zátěže, připojená na osu Y, je 114 kg. Protože tato osa je dvojitá, činí hmotnost zátěže připojené na jeden pohon 57 kg. Výpočet hmotnosti zátěže je uveden v Příloze 3.

$$f_{0Y} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_Y}{m_Y}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{20,9 \cdot 10^6}{57}} = 96,4 \text{ Hz} > 50 \text{ Hz} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (31)$$

### 9.3.4 Kontrola přiměřeného momentu setrvačnosti:

**Moment setrvačnosti kuličkového šroubu:**

$$J_{SY} = \frac{\pi d^4 L_{SY}}{32} \rho = \frac{\pi \cdot 0,016^4 \cdot 1,47}{32} \cdot 7850 = 7,424 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (32)$$

**Moment setrvačnosti, redukováný na šroub osy Y:**

$$\begin{aligned} J_{Yred} &= J_{SY} + m_Y \cdot K_S^2 = 7,424 \cdot 10^{-5} + 57 \cdot (1,592 \cdot 10^{-3})^2 = \\ &= 2,187 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 < 3,01 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje} \end{aligned} \quad (33)$$

### 9.3.5 Celkový třecí moment šroubu a jeho uložení

**Třecí moment na šroubu:**

- Úhel sklonu šroubu:  $\alpha = 0^\circ$

$$\begin{aligned} M_{TSY} &= m_Y \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot f \cdot K_S = 57 \cdot 9,81 \cdot \cos 0^\circ \cdot 0,1 \cdot 1,592 \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,089 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (34)$$

**Celkový třecí moment:**

$$\begin{aligned} M_{TY} &= M_{TSY} + M_{TU} + M_{TM} = 0,089 + 0,12 + 0,16 = \\ &= 0,369 \text{ Nm} < 0,52 \text{ Nm} \Rightarrow \text{vyhovuje} \end{aligned} \quad (35)$$

### 9.4.6 Kontrola momentu a výkonu motoru

**Statický a pracovní moment:**

$$M_{Ystat} = M_{TY} = M_{Yprac} = 0,369 \text{ Nm}$$

**Dynamický moment:**

$$\begin{aligned} M_{Ymax} &= M_{Yprac} + J_{Yred} \cdot \varepsilon = M_{Yprac} + J_{Yred} \cdot \frac{a}{K_S} = \\ &= 0,369 + 2,187 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{0,5}{1,592 \cdot 10^{-3}} = 0,438 \text{ Nm} < 2,6 \text{ Nm} \Rightarrow \text{vyhovuje} \end{aligned} \quad (36)$$

**Potřebný výkon motoru:**

$$P_{MY} = M_{Ymax} \cdot \omega_{Ymax} = 0,438 \cdot 2\pi \cdot \frac{1000}{60} = 46 \text{ W} < 820 \text{ W} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (37)$$

## 9.4 Výpočet pohonu osy Z

### 9.4.1 Kontrola maximálních otáček

$$n_{kZ} = k_d \cdot \frac{d}{l_{kZ}^2} \cdot 10^8 = 1,88 \cdot \frac{16}{770^2} \cdot 10^8 = 5073,4 \text{ min}^{-1} \quad (38)$$

$$n_{\max Z} = 0,8 \cdot n_{kZ} = 0,8 \cdot 5073,4 = 4058,7 \text{ min}^{-1} > 1000 \text{ min}^{-1} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (39)$$

### 9.4.2 Kontrola posuvové rychlosti

$$v_{Z \lim} = \sqrt{a \cdot l_Z} = \sqrt{0,5 \cdot 0,5} = 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (40)$$

### 9.4.3 Výpočet tuhosti kuličkového šroubu

**Tuhost šroubu v tahu:**

$$c_{TZ} = 4 \cdot \frac{L_{SZ}}{4 \cdot E \cdot A} = 4 \cdot \frac{770}{4 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 201,06} = 1,824 \cdot 10^{-2} \mu\text{m} \cdot \text{N}^{-1} \quad (41)$$

$$k_{TZ} = \frac{1}{c_{TZ}} = \frac{1}{1,824 \cdot 10^{-2}} = 55 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1} \quad (42)$$

**Tuhost šroubu v krutu:**

$$c_{KZ} = \frac{32 \cdot K_s^2 \cdot L_{SZ}}{G \cdot \pi \cdot d^4} = \frac{32 \cdot 1,592^2 \cdot 770}{0,81 \cdot 10^5 \cdot \pi \cdot 16^4} = 3,745 \cdot 10^{-3} \mu\text{m} \cdot \text{N}^{-1} \quad (43)$$

$$k_{KZ} = \frac{1}{c_{KZ}} = \frac{1}{3,745 \cdot 10^{-3}} = 267 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1} \quad (44)$$

**Celková tuhost:**

$$k_Z = \frac{1}{\frac{1}{k_{TZ}} + \frac{1}{k_{KZ}} + \frac{1}{k_{MS}} + \frac{1}{k_U}} = \frac{1}{\frac{1}{55} + \frac{1}{267} + \frac{1}{320} + \frac{1}{325}} = 35,6 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1} \quad (45)$$

**Vlastní frekvence kuličkového šroubu:**

- Hmotnost zátěže, připojené na pohon osy Z (viz Příloha 3):  $m_Z = 26 \text{ kg}$

$$f_{0Z} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_Z}{m_Z}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{35,6 \cdot 10^6}{26}} = 186,2 \text{ Hz} > 50 \text{ Hz} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (46)$$

#### 9.4.4 Kontrola přiměřeného momentu setrvačnosti:

**Moment setrvačnosti servomotoru Siemens 1FK7042-5AF71-1DH3:**

$$J_{m1} = 3,73 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \text{ [14]}$$

**Moment setrvačnosti kuličkového šroubu:**

$$J_{SZ} = \frac{\pi d^4 L_{SZ}}{32} \rho = \frac{\pi \cdot 0,016^4 \cdot 0,77}{32} \cdot 7850 = 3,889 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (47)$$

**Moment setrvačnosti, redukováný na šroub osy Z:**

$$\begin{aligned} J_{Zred} &= J_{SZ} + m_Z \cdot K_S^2 = 3,889 \cdot 10^{-5} + 26 \cdot (1,592 \cdot 10^{-3})^2 = \\ &= 1,048 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 < 3,73 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje} \end{aligned} \quad (48)$$

#### 9.4.5 Celkový třecí moment šroubu a jeho uložení

**Třecí moment na šroubu:**

- Úhel sklonu šroubu:  $\alpha = 90^\circ$

$$M_{TSZ} = m_Z \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot f \cdot K_S = 26 \cdot 9,81 \cdot \cos 90^\circ \cdot 0,1 \cdot 1,592 \cdot 10^{-3} = 0 \text{ Nm} \quad (49)$$

**Celkový třecí moment:**

$$\begin{aligned} M_{TZ} &= M_{TSZ} + M_{TU} + M_{TM} = 0 + 0,12 + 0,16 = \\ &= 0,28 \text{ Nm} < 0,52 \text{ Nm} \Rightarrow \text{vyhovuje} \end{aligned} \quad (50)$$

#### 9.4.6 Kontrola momentu a výkonu motoru

**Statický a pracovní moment:**

Statický moment získáme součtem celkového třecího momentu a momentu od nevyvážku. Ten je v případě svislé osy Z roven tíze hmot na ní připojených. Pracovní moment je v případě nulové řezné síly roven statickému momentu.

$$\begin{aligned} M_{Zstat} &= M_{TY} + m_Z \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot K_S = 0,28 + 26 \cdot 9,81 \cdot \sin 90^\circ \cdot 1,592 \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,69 \text{ Nm} = M_{Zprac} \end{aligned} \quad (51)$$

**Dynamický moment:**

$$\begin{aligned} M_{Zmax} &= M_{Zprac} + J_{Zred} \cdot \varepsilon = M_{Zprac} + J_{Zred} \cdot \frac{a}{K_S} = \\ &= 0,69 + 1,048 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{0,5}{1,592 \cdot 10^{-3}} = 0,723 \text{ Nm} < 2,6 \text{ Nm} \Rightarrow \text{vyhovuje} \end{aligned} \quad (52)$$

**Potřebný výkon motoru:**

$$P_{MZ} = M_{Zmax} \cdot \omega_{Zmax} = 0,723 \cdot 2\pi \cdot \frac{1000}{60} = 76 \text{ W} < 820 \text{ W} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (53)$$

## 10. Realizace stroje

Jako první byl pro stroj sestaven jeho rám. Firmou moas cs s.r.o. byly dodány hliníkové profily již nařezané na potřebné délky a se zhotovenými zahloubeními pro křížové čepy spojek, včetně všech potřebných spojek. Rám byl sestaven přímo na místě, kde bude navržený stroj umístěn – v Laboratoři prototypových technologií a procesů v nové budově „L“ Technické univerzity v Liberci (Centrum pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace). Montáž rámu byla poměrně jednoduchá a i přes velké množství použitých spojek trvala přibližně dvě a půl hodiny. Sestavený rám působí robustním a velmi tuhým dojmem.



Obr. 28 – Sestavený rám z hliníkových profilů

Bohužel kvůli průtahům ve stavbě budovy „L“ a jejího předání do užívání nebylo možné začít stroj realizovat dříve než několik dní před termínem odevzdání této práce. Proto zde nejsou popsány další fáze stavby navrženého stroje nebo ověření jeho funkčnosti. Kromě zmíněné stavby rámu proběhlo dále jen ověření, zda lze pohybovat jezdce samotné osy Z přes řídicí systém připojený k servomotoru. Tato zkouška proběhla úspěšně.

## 11. Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout konstrukci prototypu CNC stroje pro řezání plechů laserem a případně ji i realizovat. Proto byly na začátku této práce (kromě krátkého úvodu do problematiky laseru a laserového řezání) uvedeny příklady komerčně vyráběných podobných strojů. Mimo strojů pro řezání laserem byly popsány i některé příklady modelovacích frézek, protože se předpokládá možné osazení prototypu frézovacím rychlovřetenem.

Před započítím konstrukční práce byly již některé součásti určené pro stavbu tohoto stroje na KVS připraveny (zařízení pro generování laserového paprsku, řídicí systém, servomotory). Tyto součásti jsou v práci popsány.

Jako první byl pro stroj navržen jeho rám z hliníkových profilů od firmy MayTec. Dále bylo v práci řešeno připojení lineárních jednotek k rámu i mezi sebou navzájem, a to pro všechny tři osy stroje. Jednotky budou poháněny servomotory, připojenými přes pružnou vlnovcovou spojku a přírubu. Také zde bylo nastíněno upevnění laserové hlavy ke konstrukci a vedení optického kabelu. Pracovní rozsah os X a Y byl konstrukcí mírně omezen, a to na  $1275 \times 1080$  mm. Jedná se o odhad vypočítaný z CAD modelu stroje, který byl také vytvořen, a je uložen na přiloženém CD. Rozsah osy Z zůstal nezměněn (500 mm).

Pro všechny pohybové osy stroje byly provedeny kontrolní výpočty pohonů, zda vyhovují obecným zásadám pro jejich návrh. Kontrolou maximálních otáček kuličkového šroubu osy X bylo zjištěno, že z důvodu jeho délky bude nutné snížit navrženou rychlost posuvu na  $7,6 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$ . Osami Y a Z bude možné pohybovat rychlostí navrženou v zadání, tj.  $10 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$ . Jinak z tuhostního, dynamického i výkonového hlediska navržené pohony vyhovují, a nebyl by problém například další připojení menších pohyblivých hmot na osy. Také přesnost polohování, určená zadáním na 0,01 mm, by měla být dosažena. Skutečná výrobní přesnost stroje však bude muset být ještě v budoucnu zjištěna.

Co se týče realizace stroje, byla zatím provedena pouze montáž jeho rámu, a to z důvodů popsaných v předchozí kapitole.

Prototyp stroje tak, jak je navržen v této práci, jistě není zcela kompletní. Může dojít k menším úpravám v konstrukci, což je u prototypů běžné. Všechny cíle práce dané zadáním byly ale splněny. Dále bude potřeba navrhnout například způsob upínání plechů, krytování stroje, spolehlivé vedení kabelů nebo ovládání laserového zařízení přes řídicí systém Sinumerik. To vše může být námětem pro další diplomové či bakalářské práce.



## Seznam použité literatury

- [1] ZELENÝ, Petr. *Návrh a konstrukce víceúčelového CNC stroje*. Liberec, 2006. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [2] BATALA, Jaroslav. *Aplikace laseru u prototypu CNC stroje*. Liberec, 2011. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [3] Laser. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. [cit. 2012-04-18]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [4] VRBOVÁ, M. *Lasery a moderní optika - oborová encyklopedie*. Praha, 1994, 474 s. ISBN 80-858-4956-9.
- [5] Premium line. *Vhf camfacture AG* [online]. [cit. 2012-02-17]. Dostupné z: <http://www.vhf.eu/en/Machines/BasicSystems/PremiumLine>
- [6] CNC Machine FlatCom M with Servo Controller. *isel Germany AG* [online]. [cit. 2012-02-18]. Dostupné z: [http://www.cnc-machines.isel.com/cnc\\_machines\\_servo\\_control\\_FlatCom\\_M.php](http://www.cnc-machines.isel.com/cnc_machines_servo_control_FlatCom_M.php)
- [7] GPY series. *imes-icore GmbH* [online]. [cit. 2012-02-18]. Dostupné z: <http://www.imes-icore.de/en/produkte/produkt.php?idprodukt=67>
- [8] TruLaser 1030. *TRUMPF Česká republika* [online]. [cit. 2012-02-20]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/obrabeci-stroje/produkty/rezani-2d-laserem/laserova-rezaci-zarizeni/trulaser-serie-1000/trulaser-serie-1000.html>
- [9] PROFILE PLUS 3015. *AWAC spol. s r.o. – Systémy dělení materiálu* [online]. [cit. 2012-02-21]. Dostupné z: [http://www.awac.cz/?lang=cz&m1=3&m2=7&m3=11&m4=0&id\\_clanku=243](http://www.awac.cz/?lang=cz&m1=3&m2=7&m3=11&m4=0&id_clanku=243)
- [10] Cutting Machine M-1600. *Eurolaser GmbH* [online]. [cit. 2012-02-21]. Dostupné z: <http://www.eurolaser.com/products/laser-systems/m-1600/>
- [11] Fiber lasery. *Sp-Tech, s.r.o.* [online]. [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://www.sp-tech.cz/produkty/salvagnini/fiber-lasery/>

- [12] JK FIBER LASER Installation and Operation Manual. Rugby: GSI Group, 2010
- [13] JK FIBER LASER Cutting Head: User Manual and Focus Adjustment Instructions. Rugby: GSI Group, 2010
- [14] *Servomotors (Siemens PM21)*. Mnichov: Siemens AG, 2010
- [15] KURKA, Jiří. Řídicí systémy, pohony a motory pro obrábění stroje společnosti Siemens. *Automatizace* [online]. 2005, roč. 48, č. 12 [cit. 2012-02-25].  
Dostupné z: <http://www.automatizace.cz/article.php?a=984>
- [16] *Polohovací systémy*. Brno: HIWIN s.r.o., 2011
- [17] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Praha: MM publishing, 2010, 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [18] *The Profile System*. Dachau: MayTec Aluminium Systemtechnik GmbH, 2011
- [19] TOOLFLEX Type M. *KTR Kupplungstechnik GmbH* [online]. [cit. 2012-03-25].  
Dostupné z: [http://www.ktr.com/en/products/couplings/toolflex/943\\_typem.htm](http://www.ktr.com/en/products/couplings/toolflex/943_typem.htm)
- [20] Vyvažovač 9311. *Gajdečka – průmyslová technika* [online]. [cit. 2012-05-17].  
Dostupné z: <http://eshop.balancery.cz/vyvazovace/10-vyvazovac-9311.html>
- [21] SKALLA, Jan. *Návrh a dimensování polohových servomechanismů obráběcích strojů*. Liberec, 1995. Habilitační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [22] *Kuličkové šrouby & příslušenství*. Brno: HIWIN s.r.o., 2010

## Seznam příloh

		Počet stran
<b>Příloha 1</b>	Technické parametry – servomotor Siemens 1FK7	1
<b>Příloha 2</b>	Technické parametry – spojka TOOLFLEX Type M	1
<b>Příloha 3</b>	Rozpis hmotností, připojených na jednotlivé pohybové osy	2
<b>Příloha 4</b>	Výkres sestavy stroje (číslo výkresu: 1-KVS-VS-223-01-00)	1×A1
<b>Příloha 5</b>	Kusovník sestavy stroje (číslo výkresu: 4-KVS-VS-223-01-K)	2×A4
<b>Příloha 6</b>	Výrobní výkres spojovací desky (číslo výkresu: 4-KVS-VS-223-01-01)	1×A4
<b>Příloha 7</b>	Výrobní výkres spojovacího L-profilu (číslo výkresu: 4-KVS-VS-223-01-02)	1×A4

© Siemens AG 2010

## Servomotors

### Synchronous motors for SINAMICS S120

#### 1FK7 Compact motors

#### Natural cooling

#### Selection and ordering data

Rated speed	Shaft height	Rated power	Static torque	Rated torque <sup>1)</sup>	Rated current	1FK7 Compact synchronous motor	Number of pole pairs	Moment of inertia of rotor (without brake)	Weight (without brake)	
$n_{rated}$	SH	$P_{rated}$ at $\Delta T=100\text{ K}$	$M_{st}$ at $\Delta T=100\text{ K}$	$M_{rated}$ at $\Delta T=100\text{ K}$	$I_{rated}$ at $\Delta T=100\text{ K}$		$p$	$J$	$m$	
rpm		kW (HP)	Nm (lb <sub>r</sub> -ft)	Nm (lb <sub>r</sub> -ft)	A	Order No.		$10^{-4}\text{ kgm}^2$ ( $10^{-3}\text{ lb}_r\text{-in-s}^2$ )	kg (lb)	
Natural cooling										
2000	100	4.29 (5.75)	27 (19.9)	20.5 (15.1)	9.6	1FK7101-5AC71-1	4	79.9 (70.7)	21 (46.3)	
		5.23 (7.01)	36 (26.6)	25 (18.4)	11.5	1FK7103-5AC71-1	4	105 (92.9)	29 (63.9)	
		7.75 (10.4)	48 (35.4)	37 (27.3)	16	1FK7105-5AC71-1	4	156 (138)	39 (86.2)	
3000	48	0.82 (1.10)	3.0 (2.2)	2.6 (1.9)	1.95	1FK7042-5AF71-1	4	3.01 (2.66)	4.9 (10.8)	
	63	1.48 (1.98)	6.0 (4.4)	4.7 (3.5)	3.7	1FK7060-5AF71-1	4	7.95 (7.04)	7.0 (15.4)	
		2.29 (3.07)	11 (8.2)	7.3 (5.4)	5.6	1FK7063-5AF71-1	4	15.1 (13.3)	11.5 (25.4)	
	80	2.14 (2.87)	8.0 (5.9)	6.8 (5.0)	4.4	1FK7080-5AF71-1	4	15.0 (13.2)	10 (22.1)	
		3.3 (4.43)	16 (11.8)	10.5 (7.7)	7.4	1FK7083-5AF71-1	4	27.3 (24.1)	14 (30.9)	
	100	3.77 (5.06)	18 (13.3)	12.0 (8.8)	8	1FK7100-5AF71-1	4	55.3 (48.9)	19 (41.9)	
		4.87 (6.53)	27 (19.9)	15.5 (11.4)	11.8	1FK7101-5AF71-1	4	79.9 (70.7)	21 (46.3)	
		5.37 (7.20) <sup>2)</sup>	36 (26.6)	20.5 (15.1) <sup>2)</sup>	16.5 <sup>2)</sup>	1FK7103-5AF71-1	4	105 (92.9)	29 (63.9)	
		8.17 (11.0)	48 (35.4)	26.0 (19.2)	18	1FK7105-5AF71-1	4	156 (138)	39 (86.2)	
Encoder systems for motors without DRIVE-CLIQ interface:			IC2048S/R encoder			A				
			AM2048S/R encoder <sup>1)</sup>			E				
			AM32S/R encoder <sup>1)</sup>			G				
			Multi-pole resolver			S				
			2-pole resolver			T				
Encoder systems for motors with DRIVE-CLIQ interface:			IC22DQ encoder			D				
			AM22DQ encoder <sup>1)</sup>			F				
			AM16DQ encoder <sup>1)</sup>			K				
			R15DQ resolver			U				
			R14DQ resolver			P				
Shaft extension: Fitted key and keyway Fitted key and keyway Plain shaft Plain shaft			Shaft and flange accuracy: Tolerance N Tolerance N Tolerance N Tolerance N			Holding brake: Without With Without With			A	
									B	
									G	
									H	
Degree of protection:			IP64 IP66 and DE flange IP67 IP64 (IP54 for 1FK701) and anthracite paint finish IP66, DE flange IP67 and anthracite paint finish			0				
						2				
						3				
						5				

To select the type of construction and degree of protection, see Technical definitions.

## Příloha 2: Technické parametry – spojka TOOLFLEX Type M

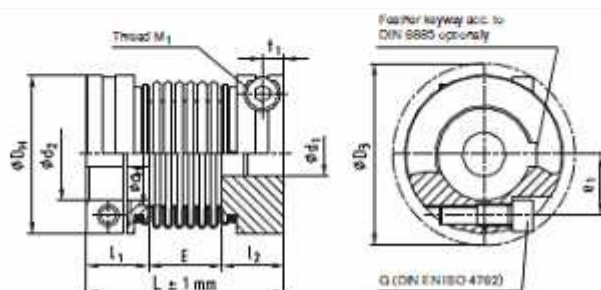
### TOOLFLEX® Metal bellow-type coupling



#### Type M



- Backlash-free, torsionally stiff
- Non-positive bellow-hub connection
- Frictionally engaged clamping hubs
- Maintenance-free
- Suitable for high temperatures due to flanged insert connection (max. 200 °C)
- Well-resistant to corrosion due to bellow made from stainless steel and aluminium clamping hubs
- Finish bore from Ø 6 mm also available with feather key acc. To DIN 6885 sheet 1 – JS9



TOOLFLEX Type M																										
Size	Dimensions (mm)																									
	Finish bore		General					Clamping screws																		
	d <sub>min</sub>	d <sub>max</sub>	L	L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	E	D <sub>h1</sub>	D <sub>h2</sub>	M <sub>1</sub>	D <sub>3</sub>	t <sub>1</sub>	q <sub>1</sub>	T <sub>k</sub> (Nm)														
16	5	16	46	130	15	32	20	M4	35.0	5	12.0	2.9														
20	8	20	62	21.5	19	40	27	M5	43.5	6	14.5	6														
30	10	30	72	23.0	26	55	33	M6	58.0	7	19	10														
38	12	38	81	25.5	30	65	42	M6	72.8	9	25	20														
42	14	42	95	30.0	35	70	46	M6	76.1	9	27	25														
45	14	45	103	32.0	39	83	58	M10	80.0	11	30	49														
55 1)	20	55	125	40.0	45	100	73	M12	106.0	14	37	120														
Technical data																										
Size	Torque T <sub>kv</sub> (Nm)	Speed n 1) (rpm)	Moment of inertia I <sub>p</sub> 2) (x10 <sup>-4</sup> kgm <sup>2</sup> )	Torsional stiffness C <sub>T</sub> (Nm/rad)	Axial spring stiffness (N/mm)	Radial spring stiffness (N/mm)	Perm. displacements			Mass 3) (x10 <sup>-3</sup> kg)																
							Axial (mm)	Radial (mm)	Angular (degrees)																	
16	5	14900	10	3050	29	92	±0.5	0.20	1.5	61																
20	15	11950	32	9900	42	128	±0.6	0.20	1.5	144																
30	35	8900	123	14800	65	155	±0.6	0.25	2.0	306																
38	55	7550	262	24900	72	212	±0.6	0.25	2.0	448																
42	95	6820	427	36500	80	333	±0.8	0.25	2.0	520																
45	150	5750	800	54000	88	402	±1.0	0.30	2.0	1125																
55 1)	340	4800	3118	95100	107	598	±1.0	0.30	2.0	3000																
Bore range and respective torques of frictional engagement of the clamping hub type 2.5 (Nm)																										
Size	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200
16	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9	9.0	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8	9.9	10.0	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	11.0
20																										
30																										
38																										
42																										
45																										
55 1)																										

<sup>1)</sup> With v = 25 m/s

<sup>2)</sup> Figures refer to the complete coupling with max. bore

<sup>3)</sup> Hubs from steel welded with bellow

Order form:	TOOLFLEX*30 M	Ø25	Ø30
	Coupling size	Finish bore	Finish bore

Příloha 3: Rozpis hmotností, připojených na jednotlivé pohybové osy

Osa Z			
Název	Hmotnost 1 ks [kg]	Počet	Hmotnost celkem [kg]
Lineární jednotka osy Z (bez jezdce)	16,8	1	16,8
Motor s brzdou	5,4	1	5,4
Příruba	0,32	1	0,32
Spojka	0,16	1	0,16
Laserová hlava	2,1	1	2,1
Kryt osy Z	0,22	2	0,44
Šroub M6×16	0,007	4	0,028
Šroub M4×20	0,003	6	0,018
Šroub M6×50	0,014	2	0,028
T-matice M6	0,005	2	0,01
Celkem: 25,3 kg ≈ <b>26 kg</b>			

Osa X			
Název	Hmotnost 1 ks [kg]	Počet	Hmotnost celkem [kg]
Zátěž osy Z	26	1	26
Jezdec osy Z	7	1	7
Jezdec osy X	7	1	7
Spojovací deska	1,56	1	1,56
Šroub M6×25	0,009	12	0,108
Kolík 6×20	0,004	4	0,016
Pružná podložka 6	0,0004	12	0,005
Celkem: 41,69 kg ≈ <b>42 kg</b>			

Osa Y			
Název	Hmotnost 1 ks [kg]	Počet	Hmotnost celkem [kg]
Zátěž osy X	42	1	42
Lineární jednotka osy X (bez jezdce)	45,8	1	45,8
Jezdec osy Y	7	2	14
Motor bez brzdy	4,9	1	4,9
Spojka	0,16	1	0,16
Příruba	0,32	1	0,32
Spojovací L-profil	2,63	2	5,26
Kryt osy X	0,44	2	0,88
Destička se závitem (těžký typ)	0,016	8	0,128
Šroub M6×16	0,007	4	0,028
Šroub M4×20	0,003	6	0,018
Šroub M8×22	0,016	8	0,128
Pružná podložka 6	0,0004	6	0,0024
Pružná podložka 8	0,001	8	0,008
Celkem: 113,5 kg ≈ <b>114 kg</b>			